

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 1 (17)

2011

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Вашкевич Н. П., Бикташев Р. А.</i> Достоинство формального языка, основанного на концепции недетерминизма, при структурной реализации параллельных систем логического управления процессами и ресурсами.....	3
<i>Дубинин В. Н., Вяткин В. В.</i> Формализация моделей выполнения функциональных блоков ИЕС 61499	12
<i>Репин А. Ю., Фионова Л. Р., Епишин И. Г.</i> Диалоговая информационная система разработки текстовой конструкторской документации	24
<i>Зинкина Н. С.</i> Методы и модели логического управления дискретными процессами в распределенных вычислительных системах на основе концепции согласования.....	35
<i>Васильев Н. Г., Федотов Н. Г., Васильев Д. Н.</i> Распознавание образов как приложение для квантового компьютера.....	48
<i>Старков Е. Г., Куликовский К. Л.</i> Коррекция траектории движения научно-исследовательских планирующих подводных зондов	58
<i>Таранцев Е. К.</i> Моделирование цветными сетями Петри процесса регистрации радиолокационной информации.....	70
<i>Романенко В. А.</i> Имитационная модель технологических процессов наземного обслуживания перевозок в аэропорту	79
<i>Сальников И. И., Чернышев М. Н.</i> Определение размера и скорости движения нарушителя в двухпозиционных охранных системах ближней радиолокации.....	96
<i>Финогеев А. Г., Маслов В. А., Финогеев А. А.</i> Структура электронной образовательной среды с использованием гетерогенных сетей для доступа к информационным ресурсам	106

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

<i>Тычков А. Ю., Чураков П. П., Кривоногов Л. Ю.</i> Автоматизированная система обработки и анализа электрокардиосигналов в условиях интенсивных помех различного вида	117
--	-----

<i>Иосифов В. П.</i> Определение полных динамических характеристик средств измерений с применением рекуррентных процедур	126
<i>Ашанин В. Н.</i> Синтез $\Sigma\Delta$ -АЦП с многоуровневым ЦАП на основе широтно-импульсного модулятора	132
<i>Добровинский И. Р., Ломтев Е. А., Медведик Ю. Т., Стеблев П. М., Трофимов А. А.</i> Использование топологических графов для расчета схем узлов средств измерений на операционных усилителях и анализа их погрешностей	139
<i>Кузьмин Д. А., Горячев В. Я.</i> Исследование качества электрической энергии при наличии потребителей с нелинейными нагрузками	148
<i>Бильфельд Н. В., Жукотская Н. В.</i> Метод реализации эффективного компенсирующего устройства на промышленных контроллерах	156
<i>Чиркина М. А., Юрков Н. К., Якимов А. Н.</i> Математическое моделирование устройств сверхвысоких частот на магнитных нанокompозитах	167
<i>Самохвалов М. К., Тахтенкова М. О.</i> Математическое моделирование переходных электрических процессов в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах с последовательным резистором цепи в схемах управления индикаторами	175
<i>Колготин П. В., Колотков А. Ю., Дорошкевич В. В., Румянцева Н. Б., Зефирова С. Л., Султанов Б. В.</i> Исследование асимптотической устойчивости систем фазовой синхронизации с равномерной дискретизацией	187

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Снигерев Б. А.</i> Математическое моделирование неизотермической экструзии полимерной жидкости из ступенчатой формирующей насадки	196
<i>Виноградов С. Н., Севостьянов Н. В.</i> Износостойкие с низким значением переходного электросопротивления покрытия сплавом медь-никель	203
<i>Артемов И. И., Кривчик В. Д., Меньшова С. Б., Келасьев В. В., Маринина Л. А.</i> Модель развития фреттинг-коррозии в поверхностном слое листа рессоры	213

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 50.03.03;50.09.47

Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев

ДОСТОИНСТВО ФОРМАЛЬНОГО ЯЗЫКА, ОСНОВАННОГО НА КОНЦЕПЦИИ НЕДЕТЕРМИНИЗМА, ПРИ СТРУКТУРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ И РЕСУРСАМИ¹

Аннотация. Рассматриваются два подхода к решению поставленной задачи, которые базируются на использовании результатов детерминизации исходного управляющего алгоритма и его параллельно-последовательной декомпозиции на подмножества несовместимых и совместимых частных событий, реализуемых в управляющем алгоритме. По результатам такой декомпозиции управляющий алгоритм реализуется или на основе параллельной распределенной системы логического управления, или на основе одного микропрограммного автомата с параллельным выполнением микроопераций.

Ключевые слова: недетерминированные автоматы, алгоритмы логического управления, параллельная декомпозиция, распределенные системы, наноккоманды.

Abstract. The article considers two approaches to resolving the stated problem, which are based on the use of results of determinisation of initial control algorithm (CA) and its parallel-serial decomposition for the subsets of incompatible and compatible private events realised in CA. According to results of such decomposition, the CA is realised either on the basis of parallel distributed SLC, or on the basis of one microprogram automatic machine with parallel performance of microoperations.

Key words: nondeterministic automata, logical control algorithms, parallel decomposition, distributed systems, nanoinstructions.

Введение

В работе предполагается, что исходные управляющие алгоритмы (УА), заданные моделью недетерминированных автоматов (НДА), представляются в аналитической форме в виде системы рекуррентных канонических уравнений (СКУ), описывающих все частные события, реализуемые в УА [1, 2]. После детерминизации таких УА получим представление УА моделью детерминированного автомата (ДА), эквивалентного исходному НДА [1, 3]. Тогда структуру системы логического управления можно в принципе построить в виде одного общего управляющего автомата на основе использования из-

¹Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009–2010 года), № гос. регистрации НИР 01200952061.

вестных классических методов структурного синтеза конечных ДА. Однако такая структура управляющего автомата будет иметь много недостатков, главные из них: исчезает простота, компактность и наглядность исходного УА, представленного моделью НДА, в результате его двойного преобразования: при выполнении операции детерминизации и при кодировании внутренних состояний ДА; значительно увеличивается сложность комбинационных схем, определяющих функции возбуждения элементов памяти управляющего автомата; затрудняются выполнение контрольных операций системы управления и уменьшается ее надежность.

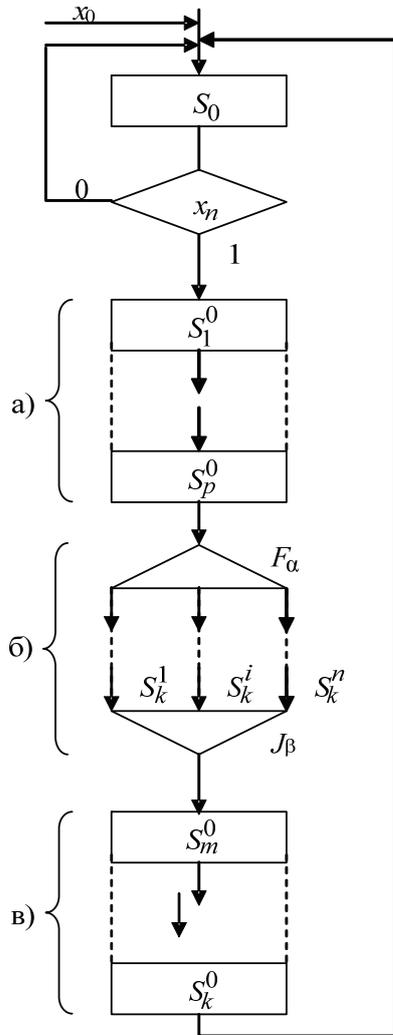
В связи с изложенным в статье рассматриваются другие методы и подходы к построению структуры системы логического управления для УА, заданных моделью НДА, которые позволили бы в той или иной степени не только избежать отмеченных выше недостатков использования классического метода синтеза структуры управляющего автомата, но и развить новые более эффективные методы, которые вытекают из достоинств представления УА моделью НДА. Такое достоинство моделей НДА, заключающееся в скрытом в них параллелизме, проявляется в том, что под действием одного и того же входного сигнала возможен переход от некоторого частного события к нескольким частным событиям, совокупность которых и будет представлять собой одно из внутренних состояний ДА, эквивалентного исходному НДА. Откуда следует, что использование модели НДА является самым компактным представлением УА, поскольку при детерминизации НДА с m реализуемыми в нем частными событиями эквивалентный ему ДА будет иметь $M \leq 2^m$ состояний. В данном случае под частными событиями, в зависимости от уровня детализации УА, понимаются: для вычислительных алгоритмов – выполнение некоторых актов обработки информации, к которым могут относиться выполнение микроопераций и макроопераций, функциональных операторов и подпрограмм и т.д., а для УА промышленной автоматики и объектами – выполнение отдельных технологических операций или групп операций.

В статье рассматриваются методы и подходы к построению структур систем логического управления, обеспечивающие параллельную обработку информации, основанные на параллельно-последовательной декомпозиции УА, представленных моделями НДА. Статья является продолжением рассмотрения достоинств формального языка, основанного на концепции недетерминизма, представленных в [4].

1. Метод, базирующийся на разбиении частных событий, реализуемых в управляющем алгоритме, на группы несовместимых событий

Если исходный УА, заданный моделью НДА, допускает разбиение всех частных событий на группы несовместимых событий, то структуру такого алгоритма в самом общем виде можно представить в виде графа, включающего последовательную и параллельную компоненты (рис. 1) [5]. Такая декомпозиция УА базируется на использовании результатов детерминизации исходного УА, когда будет определен состав всех состояний ДА, эквивалентного исходному НДА, каждое из состояний ДА будет представлено совокупностью частных событий, одновременное существование которых в соответствии с исходным УА возможно. Такая информация о состояниях ДА позволит построить вспомогательную матрицу совместимости частных событий,

на основе которой можно построить матрицу включения, которая и определит разбиение всех частных событий на подмножества несовместимых событий. Формальный алгоритм такого разбиения частных событий представлен в [2, 5]. Каждая такая группа несовместимых частных событий войдет в одну из ветвей параллельной компоненты граф-схемы алгоритма (ГСА) (рис. 1) и может быть реализована отдельным рабочим подавтоматом (п/А). В данном случае частные события, входящие в одну из параллельных ветвей, могут выполняться только последовательно, а между группами параллельно.



- x_0 – сигнал приведения системы управления в начальное состояние;
- S_1^0 – первое событие начальной части последовательной компоненты;
- S_p^0 – событие, определяющее начало параллелизации алгоритмического процесса;
- S_m^0 – событие, свидетельствующее о выходе алгоритмического процесса за вершину объединения параллельных ветвей;
- S_k^i – событие, свидетельствующее об окончании алгоритмического процесса в i -й ветви;
- S_k^0 – заключительное событие алгоритма управления;
- F_α – разветвительная вершина;
- J_β – соединительная вершина

Рис. 1. ГСА обобщенной структуры управляющего алгоритма с параллельными ветвями: а – начальная часть последовательной компоненты; б – параллельная компонента; в – заключительная часть последовательной компоненты

Состав последовательной компоненты управляющего алгоритма определяется исходя из следующего. При построении матрицы включения некоторые частные события могут быть несовместимы ни с одним из частных событий исходного управляющего алгоритма, т.е. они не входят в состав ни од-

ного из сочетаний частных событий, образующих состояния ДА. Такая группа событий образует последовательную компоненту УА, которая реализуется главным п/А, на который будут возлагаться также и функции синхронизации параллельных ветвей. Обычно последовательная компонента УА для реальных управляющих систем состоит из двух частей (рис. 1): первая, начальная, часть служит в основном для выполнения подготовительных операций алгоритма управления, связанных с инициализацией и подготовкой информации для реализации параллельных ветвей. Конечным событием этой части является событие S_p^0 . Вторая, заключительная, часть последовательной компоненты общего УА служит для выполнения функций, связанных с обработкой информации, полученной в результате выполнения параллельных ветвей исходного УА.

Декомпозиция УА в виде структуры, представленной на рис. 1, как было отмечено выше, может быть реализована распределенной системой управляющих автоматов, состоящей из нескольких параллельно работающих рабочих п/А и одного главного п/А. Обобщенные ГСА таких подавтоматов представлены на рис. 2, 3.

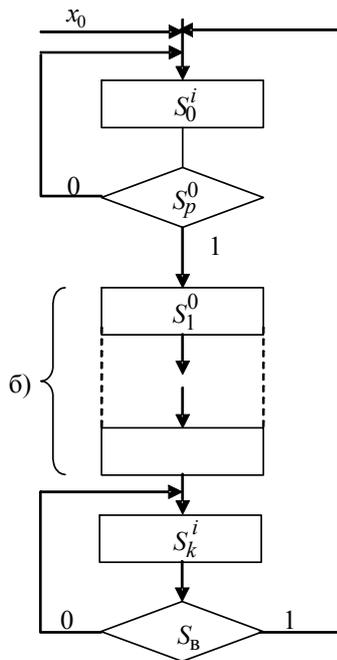


Рис. 2. ГСА i -го рабочего п/А

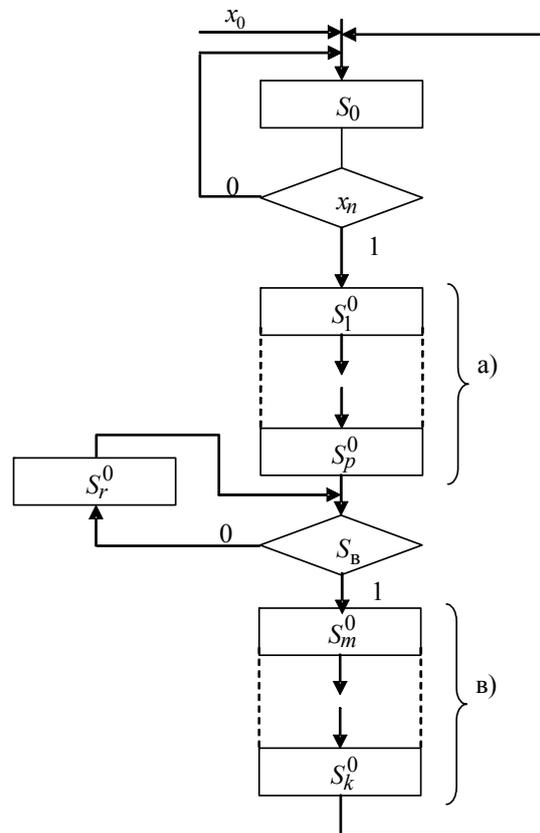


Рис. 3. ГСА главного п/А

Примечание. Рассматриваемые в данной работе автоматы являются автоматами Мура и для простоты их графического представления выходные сигналы, отмечающие каждое событие (состояние), на ГСА опущены.

Из рис. 2, 3 видно, что в алгоритмы работы рабочих п/А и главного п/А введены дополнительные события, обеспечивающие синхронизацию работы системы логического управления. К ним относятся частные события:

S_0^i – событие, определяющее начальное состояние i -го рабочего п/А;

S_B – комбинационное событие, определяющее условие выхода алгоритмического процесса за вершину объединения параллельных ветвей;

S_r^0 – событие, символизирующее ожидание истинности условия выхода алгоритмического процесса за вершину объединения параллельных ветвей.

Событие S_B в общем случае может зависеть как от событий типа S_k^i , так и от частных событий, реализуемых в параллельных ветвях. Однако для большинства практических случаев событие S_B в основном зависит только от событий типа S_k^i . Например, для так называемой барьерной синхронизации событие S_B определится в виде конъюнкций событий типа S_k^i : $S_B = S_k^1 S_k^2 \dots S_k^i \dots S_k^n$.

Следует отметить, что возможен и другой вариант реализации функций главного п/А, когда его функции возлагаются на один из рабочих п/А. Тогда ГСА одного из рабочих п/А примет следующий вид (рис. 4).

Рассмотренный метод декомпозиции исходного управляющего алгоритма на параллельно-последовательные составляющие с возможностью их структурной реализации отдельными п/А базировался на учете связи частных событий исходного УА только по управлению и информации без учета связи событий по данным и ресурсам. Поэтому, если отдельные пары частных событий, зависящие по данным и ресурсам, размещаются в разных параллельных ветвях, то при реализации алгоритма обработки информации могут возникнуть критические тупиковые ситуации. Чтобы избежать таких ситуаций, необходимо выполнить коррекцию состава подмножеств несовместимых частных событий.

Возможны два варианта решения задачи коррекции состава подмножеств несовместимых частных событий, которые могут позволить избежать тупиковых ситуаций. Для первого варианта необходимо воспользоваться вспомогательной матрицей зависимости частных событий по данным и ресурсам.

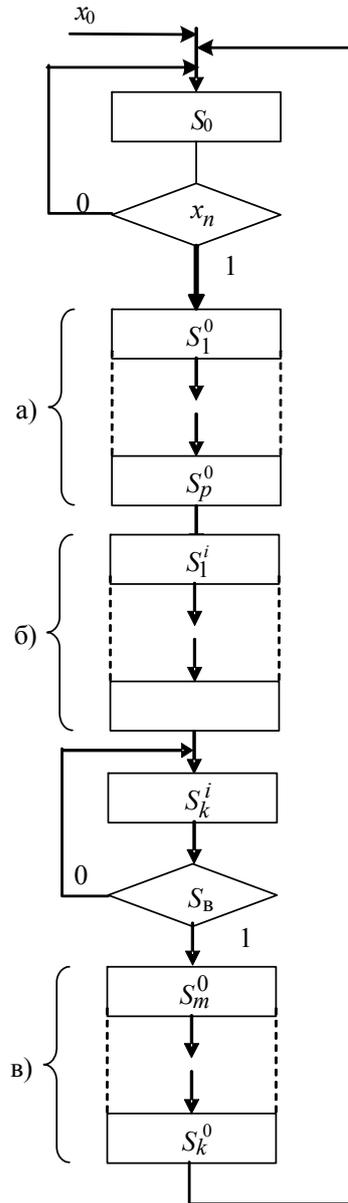


Рис. 4. ГСА i -го рабочего п/А, выполняющего функции главного п/А

Возможно положительное решение в том случае, если имелась возможность отнести рассматриваемые частные события в одно из нескольких подмножеств [6].

Второй вариант коррекции состава подмножеств несовместимых частных событий базируется на такой коррекции исходного УА путем его эквивалентного преобразования, когда частные события, связанные по данными ресурсам, ни при каких условиях не могли бы выполняться совместно. Такая коррекция исходного УА возможна в том случае, если в отдельных параллельных ветвях имеются такие частные события, которые хотя и связаны по данным и ресурсам с событиями, входящими в другие параллельные ветви, но внутри своей ветви они не связаны жестко по информации и управлению [7]. В этом случае необходимо корректировать размещение таких событий в отдельных параллельных ветвях таким образом, чтобы в результате детерминизации скорректированного исходного УА не имели место состояния ДА, в которые вошли бы совместно события, зависящие по данным и ресурсам [6].

В заключение отметим, что окончательно выбор оптимального варианта размещения частных событий по параллельным ветвям будет определяться временем реализации УА в его параллельных ветвях, когда это время не будет сильно различаться, что будет способствовать увеличению производительности системы. Если коррекция состава подмножеств несовместимых частных событий невозможна, то, чтобы избежать критических тупиковых ситуаций, необходимо использовать один из методов синхронизации параллельных процессов при обращении к общему ресурсу [8].

2. Методы, базирующиеся на унитарном кодировании частных событий

Для некоторых вариантов УА, представленных моделью НДА, частные события не могут быть разложены на группы несовместимых событий из-за их большой связности, что выясняется после детерминизации исходного УА. Поэтому такой УА невозможно реализовать на основе структуры, состоящей из параллельно работающих п/А. Для таких УА может быть предложен другой подход и методы построения структуры системы управления, основанные на использовании унитарного кодирования частных событий [9]. В этом случае возможны два варианта построения структуры системы управления, соответствующие одноуровневой и двухуровневой организации функций выходов системы управления.

Для первого варианта (одноуровневая организация функций выходов) структурная схема будет соответствовать классической структурной схеме цифрового автомата с памятью, но для которой функция возбуждения элементов памяти для любого i -го элемента, например для Д-триггеров, будет полностью соответствовать описанию правой части для i -го частного события системы канонических рекуррентных уравнений, представляющих исходный УА, т.е.

$$q_i(t) = Q_i(t+1) = S_i(t+1),$$

где $q_i(t)$ – функция возбуждения i -го Д-триггера, а $Q_i(t)$ – его состояние.

Отличительной особенностью первого варианта структурной схемы управляющего устройства, построенной на основе унитарного кодирования частных событий, представленных моделью НДА, по сравнению со схемой,

построенной на основе использования модели ДА, эквивалентного НДА, является ее значительная простота и компактность. Это объясняется тем, что функции переходов в алгоритме управления представляются не в терминах состояний ДА, а в терминах частных событий, число которых значительно меньше числа m состояний ДА.

Второй вариант построения структурной схемы для двухуровневой реализации функций выходов целесообразно использовать для построения систем микропрограммного управления (МПУ), для которых в операционном блоке должны параллельно выполняться различные микрооперации, а управляющий алгоритм содержит много повторяющихся комбинаций из них. Такие комбинации микроопераций, выполняемые одновременно, принято называть наноконандой [10].

Для такого варианта структуры системы МПУ первый уровень, определяющий функции переходов управляющего алгоритма, представляется многовыходной комбинационной схемой, которая будет полностью соответствовать структуре первого варианта, реализующей функции возбуждения элементов памяти. Второй уровень, реализующий функции выходов системы управления, представляется нанопамятью со схемой формирования адресов наноконанд (ФАНК). Блок ФАНК, в свою очередь, реализуется комбинационной схемой, которая строится по результатам детерминизации исходного УА, в соответствии с которым определяются все возможные подмножества (сочетания) одновременно существующих частных событий. Каждому такому подмножеству ставится в соответствие адрес нанопамати, по которому в нанопамать записывается код совокупности управляющих выходных сигналов, которыми отмечаются частные события, входящие в конкретное подмножество (так как используется модель автомата Мура). Отсюда следует, что подмножества выходных управляющих сигналов, представляющие наноконанды, будут инициировать параллельное выполнение частных событий исходного УА, реализуемых в операционном блоке системы управления.

Из отмеченного выше следует, что многовыходную схему блока ФАНК, определяющую адреса наноконанд, можно представить в виде следующей таблицы соответствия (табл. 1).

Таблица 1

Коды подмножеств частных событий, выполняемых параллельно	Коды наноконанд	Коды адресов наноконанды
$S_0 S_1 S_2 \dots S_i \dots S_n$	$y_0 y_1 y_2 \dots y_k$	$p_1 p_2 \dots p_j \dots p_n$

Следует отметить, что для большинства практических управляющих алгоритмов булевы функции $p_j(t)$, определяющие коды адресов наноконанд, будут не полностью определенными, что позволит в значительной степени уменьшить их сложность. Это объясняется тем обстоятельством, что функции $p_j(t)$ зависят практически не от всех комбинаций частных событий, реализуемых в управляющем алгоритме.

Двухуровневая реализация системы МПУ дает большой эффект при высокой частоте появления одинаковых адресов наноконанд для некоторых

подмножеств частных событий. Двухуровневая организация системы управления позволяет: сохранить возможность параллельного выполнения микроопераций и эффективно использовать память системы МПУ, так как исключаются адреса с одинаковыми подмножествами управляющих сигналов; упростить структуру блока, реализующего функции переходов УА (так как используется унитарное кодирование частных событий), а основой его построения является модель НДА, представляющая самое компактное описание алгоритма управления по сравнению с другими языками [4, 5]. Следует также отметить, что многовыходные булевы функции, определяющие функции переходов управляющего алгоритма и функции формирования адресов наноконанд, а также функции синхронизации параллельных процессов, могут быть эффективно реализованы на основе использования ПЛИС [11]. Подобная двухуровневая структурная организация системы МПУ используется, например, в микропроцессоре MC 68010 фирмы «Моторола» [10].

Заключение

Рассмотренные в статье методы и подходы к структурной реализации управляющих алгоритмов свидетельствуют об эффективности использования языка НД СКУ для построения систем логического управления, которая заключается в следующем:

– обеспечивается параллельная реализация УА на основе их наглядных, простых и компактных формальных представлений, в том числе аналитически и графически;

– обеспечивается простая и удобная трансформация формального аналитического представления УА к его структурной реализации (например, реализация функций переходов в УА).

Список литературы

1. **Вашкевич, Н. П.** Синтез микропрограммных управляющих автоматов : учебное пособие / Н. П. Вашкевич. – Пенза : Изд-во Пенз. политехн. ин-та, 1990. – 115 с.
2. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы и их использование для синтеза систем управления : учебное пособие / Н. П. Вашкевич, С. Н. Вашкевич. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1996. – 88 с.
3. **Зубков, В. А.** Алгоритм синтеза цифровых автоматов Мура с использованием языка исчисления предикатов / В. А. Зубков, Н. П. Вашкевич // Вычислительная техника: ученые записки. – Пенза : Изд-во Пенз. политехн. ин-та, 1969. – Вып. 3. – С. 25–36.
4. **Вашкевич, Н. П.** Достоинства формального языка, основанного на концепции недетерминизма, для функционального описания и преобразования алгоритмов логического управления процессами и ресурсами в параллельных системах обработки информации / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев // Телекоммуникации. – 2011. – № 1. – С. 18–26.
5. **Вашкевич, Н. П.** Об одном способе синтеза цифровых автоматов по граф-схеме алгоритма с параллельными ветвями / Н. П. Вашкевич // Вычислительная техника : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 1, 2. – Пенза : Изд-во Пенз. политехн. ин-та, 1973. – С. 49–57.
6. **Вашкевич, Н. П.** Параллельная декомпозиция алгоритмов управления вычислительными и технологическими процессами / Н. П. Вашкевич // Новые информационные технологии и системы : труды VIII МНТК. – М., 2008. – Ч. 1. – С. 81–98.

7. **Мищенко, В. А.** Теория эквивалентных преобразований алгоритмов в САПР СБИС / В. А. Мищенко. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 263 с.
8. **Вашкевич, Н. П.** Автоматный подход к формализации алгоритмов управления взаимодействующими параллельными процессами при обращении к общим переменным (общему ресурсу) для n -процессов / Н. П. Вашкевич // Вычислительные системы и технологии : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 1 (27). – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – С. 3–10.
9. **Вашкевич, Н. П.** Синтез цифровых управляющих автоматов на основе систем канонических уравнений : учебное пособие / Н. П. Вашкевич, В. Г. Пучков. – Пенза : Изд-во Пенз. политехн. ин-та, 1980. – 102 с.
10. **Мотоока, Т.** Компьютеры на СБИС : в 2-х кн. / Т. Мотоока, С. Толента, Х. Танака, Т. Сайто, Т. Уэхара. – М. : Мир, 1988. – Кн. 1. – 392 с.
11. **Вашкевич, Н. П.** Аппаратная реализация функций синхронизации параллельных процессов при обращении к разделяемому ресурсу на основе ПЛИС / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, Е. И. Гурин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 3–12.

Вашкевич Николай Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет

E-mail: vt@alice.pnzgu.ru

Vashkevich Nikolay Petrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer science,
Penza State University

Бикташев Равиль Айнулович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра вычислительных машин
и систем, Пензенская государственная
технологическая академия

E-mail: bra559620@sura.ru

Biktashev Ravil Aynulovich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of computer science, Penza State
Technological Academy

УДК 50.03.03;50.09.47

Вашкевич, А. П.

Достоинство формального языка, основанного на концепции недетерминизма, при структурной реализации параллельных систем логического управления процессами и ресурсами / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 3–11.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ IEC 61499¹

Аннотация. Рассматривается формализованное представление моделей выполнения функциональных блоков международного стандарта IEC 61499 на основе функций возбуждения функциональных блоков, построенных с использованием предикатов и функций времени выполнения. Предлагается расширенный набор моделей выполнения функциональных блоков, включающий как традиционные модели, так и нетрадиционные. Освещаются вопросы обработки входных событий в моделях выполнения.

Ключевые слова: функциональный блок, стандарт IEC 61499, модель выполнения, классификация, формализация, семантика, функция возбуждения.

Abstract. The article considers a formalized representation of IEC 61499 functional blocks execution models based on functional blocks excitation functions built using run-time predicates and functions. The authors suggest an extended set of execution models including both conventional models and unconventional ones. The article also deals with questions of input event processing in the execution models.

Key words: functional block, standard IEC 61499, execution model, classification, formalization, semantics, excitation function.

Введение

Современным тенденциям развития систем промышленной автоматизации наиболее полно соответствует международный стандарт IEC 61499, определяющий путь построения распределенных компонентно-базированных систем управления промышленными процессами на основе функциональных блоков (ФБ) [1]. Широкое распространение стандарта сдерживается наличием в нем так называемых «семантических дыр» [2]. Одной из особенностей предложенной в стандарте семантики ФБ является недетерминированность модели ФБ. Это может привести к тому, что одно и то же приложение будет выполняться по-разному на различных платформах. Для решения проблемы недетерминизма ФБ были предложены модели выполнения ФБ. В настоящее время наибольшее признание получили три модели выполнения: циклическая, синхронная и последовательная [2–4].

Существует два пути реализации систем управления на основе ФБ с учетом сложившихся реалий:

- 1) с ориентацией на конкретную среду выполнения, поддерживающую одну из моделей выполнения (рис. 1,а);
- 2) на основе универсальной среды выполнения ФБ.

При этом для задания конкретной модели выполнения используется специальная управляющая информация для интерпретации ФБ (рис. 1,б).

Первый подход нашел наибольшее распространение на практике. В настоящее время существует множество сред выполнения с собственными моделями выполнения.

¹ Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)», № гос. регистрации НИР 01200952061.



Рис. 1. Подходы к реализации систем управления на основе ФБ

Среди наиболее известных можно выделить следующие системы: FBDK/FBRT, FBench, 4DIAC/FORTE, CORFU-FBDK, ISaGRAF, nxtControl, μ Crons, FUBER и СЕС. Второй подход является более универсальным и гибким, в нем отсутствует жесткая привязка к конкретной среде выполнения или платформе. Однако в данном случае производителями управляющего программного обеспечения должна обеспечиваться поставка как самой системы ФБ, так и закодированной определенным образом модели выполнения. Таким образом, здесь просматривается концепция аннотированного (моделью выполнения) управляющего приложения. Одним из вариантов для представления модели выполнения является использование концепции параметризации [5]. Другой вариант, предлагаемый в данной работе, основан на формульном задании моделей выполнения. Данный подход открывает возможность формирования практически любой модели выполнения, включая все известные. Достижимая гибкость в формировании моделей выполнения позволит, например, задать повышенный приоритет для определенного пути прохождения критического сигнала при определенных условиях. Кроме того, этот механизм дает возможность условно исключать и включать ФБ в процесс планирования, что является очень полезной опцией при проектировании *реконфигурируемых систем*. Но, несмотря на очевидные преимущества, второй подход на практике пока не используется. Это можно объяснить рядом причин, в числе которых сложность метода и потеря быстродействия из-за накладных затрат на интерпретацию.

В настоящее время работы по формальному представлению моделей выполнения ФБ как отдельной области исследования практически отсутствуют. Наиболее близкими работами по этой тематике являются: статья [6], в которой описана параллельная асинхронная модель выполнения ФБ, причем в качестве гранулы выполнения выбран *ЕС*-переход; статья [3], в которой предложено использование динамически изменяемых приоритетов как основы для определения порядка выполнения ФБ; работа [4], посвященная описанию семантики синхронной модели выполнения.

Формальное представление моделей выполнения может служить основой для построения интерпретаторов ФБ, составляющих ядро среды выполнения ФБ. Совокупность «модель ФБ + модель выполнения ФБ» представляет собственно модель системы управления, которую можно использовать для верификации.

1. Классификация моделей выполнения ФБ

На рис. 2 предлагается расширенная классификация моделей выполнения ФБ с включением в нее новых моделей.

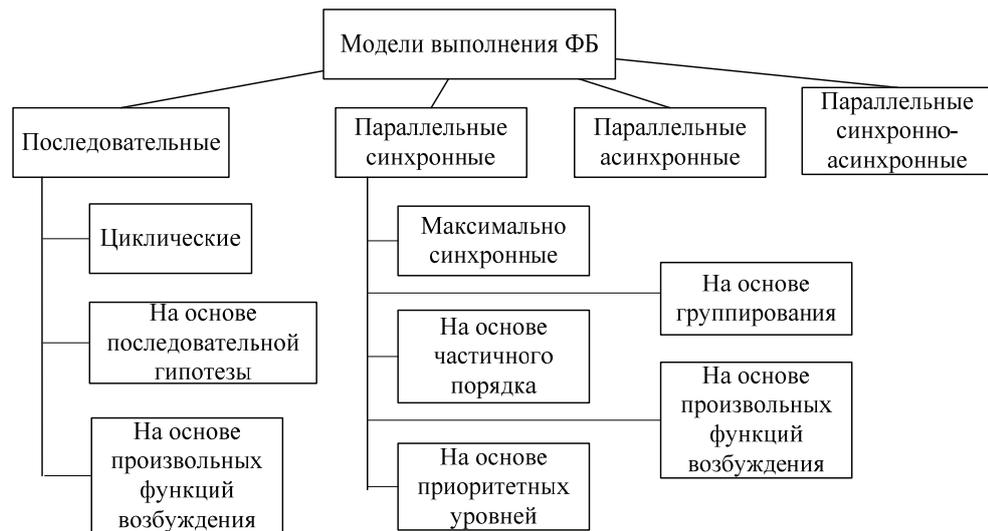


Рис. 2. Классификация моделей выполнения ФБ (по режимам выполнения)

Как видно из рис. 2, все модели по режиму выполнения можно разделить на последовательные и параллельные, последние, в свою очередь, делятся на синхронные, асинхронные и синхронно-асинхронные. Следует отметить, что существуют и другие классификационные признаки [5]. В дальнейшем для определенности примем за гранулу выполнения функциональный блок.

Для удобства пояснения моделей выполнения введем понятие (дискретного) модельного времени. Можно считать, что работа в последовательной и синхронной моделях тактируется некоторым абстрактным внешним генератором. В один и тот же момент модельного времени могут одновременно выполняться несколько гранул, но в реальном времени они могут выполняться как последовательно (псевдопараллельное выполнение), так и параллельно. В последовательных моделях выполнения в каждый модельный момент времени выполняется ровно один ФБ, а в синхронных – несколько ФБ.

В асинхронной модели понятие модельного времени отсутствует, срабатывание разрешенного ФБ может производиться в любой момент реального времени. Таким образом, в данной модели порядок срабатывания разрешенных ФБ не определен (по аналогии со срабатываниями разрешенных переходов в сетях Петри [7]). Стандарт IEC 61499 определяет именно асинхронную модель выполнения ФБ. В синхронно-асинхронных моделях вся система ФБ состоит из неперекрывающихся областей ФБ, в каждой из которых определено свое локальное модельное время. В то же время эти части функционируют независимо и асинхронно друг относительно друга. Например, если в системе принята синхронная модель выполнения, то в действительности чисто синхронно будут выполняться ФБ, принадлежащие только одному ресурсу. Подсистемы ФБ, принадлежащие разным устройствам (и даже ресурсам), будут выполняться асинхронно по отношению друг к другу. Для синхронизации выполнения ФБ в пределах всего распределенного предложения можно ввести, например, сетевой механизм рассылки тактирующих сообщений. Однако эта область исследований выходит за рамки данной статьи.

2. Формализованное определение моделей выполнения

Ниже формально определяются основные модели выполнения, представленные на рис. 2, на основе функций возбуждения ФБ (спусковых функций). С помощью этого механизма можно определить порядок выполнения ФБ. Строго говоря, модель выполнения, кроме порядка выполнения, включает правила обработки входных сигналов и выдачи выходных сигналов, правила передачи сигналов и данных между блоками, правила интерпретации диаграммы *ECC*, но среди данных аспектов порядок выполнения ФБ является определяющим.

Предварительно введем ряд определений.

$FB = \{fb_1, fb_2, \dots, fb_n\}$ – множество ФБ, входящих в систему и подлежащих исполнению.

$EI^j = \{ei_1^j, ei_2^j, \dots, ei_k^j\}$ – множество событийных входов блока fb_j . В дальнейшем для простоты верхний индекс будет опускаться.

$ZEI: EI \rightarrow \{0, 1\}$ – функция значений входных событийных переменных. Если $ZEI(ei_j) = 1$, то входная событийная переменная ei_j установлена (иными словами, сигнал присутствует на входе), иначе – сброшена;

Предикат *activeFB*: $FB \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ определяет ФБ, являющиеся *активными* в текущий момент модельного времени. Предикат задает так называемую функцию возбуждения (или спусковую функцию). Интерпретатором будет сделана попытка запуска активного ФБ. В дальнейшем для краткости предикаты будем определять только именем, без показа самого отображения. Пример определения вышеприведенного предиката: *activeFB*(fb_i). Обозначим $FB_a = \{fb \in FB \mid \text{activeFB}(fb)\}$ – множество активных ФБ в текущий момент модельного времени.

Предикат *activeFBPrev*(fb_j) определяет, являлся ли блок fb_j активным в предыдущий момент модельного времени. Обозначим $FB_{ap} = \{fb \in FB \mid \text{activeFBPrev}(fb)\}$ – множество ФБ, которые были активными непосредственно в прошлом.

Предикат *enabled*(fb_j) = $\exists ei \in EI [ZEI(ei) = 1]$ определяет, является ли разрешенным в текущий момент модельного времени блок fb_j . ФБ является *разрешенным*, если хотя бы на одном из его событийных входов находится сигнал. Определим $FB_e = \{fb \in FB \mid \text{enabled}(fb)\}$ – множество разрешенных ФБ.

Функция *EOS*(fb_j) определяет линейно-упорядоченное мультимножество сигналов (последовательность), выданных блоком $fb_j \in FB$ при своем выполнении. В данном случае сигналы идентифицируются событийными выходами ФБ, на которых они находятся. Упорядоченность определяется порядком выдачи сигналов.

Функция *EIS*(fb_j) определяет последовательность сигналов, которые появились на входах ФБ в результате выполнения блока fb_j . Упорядоченность определяется порядком появления сигналов на входах.

Функция *OF*(fb_j) определяет последовательность блоков-приемников сигналов, выданных с блока fb_j при его выполнении. Упорядоченность определяется порядком получения соответствующими блоками входных сигналов.

Функция *pr*: $FB \cup EI \rightarrow N_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$ определяет приоритет блока или событийного входа.

Отношение предпочтения $Pref \subseteq FB \times FB$ служит для определения наиболее предпочтительных блоков для выполнения. Это отношение частич-

ного порядка. Если $(fb_i, fb_j) \in Pref$, то выполнение блока fb_i предпочтительнее выполнения блока fb_j .

Отношение $PoolOrder \subseteq FB \times FB$ задает жесткий порядок выполнения ФБ в циклической модели. С помощью этого отношения все ФБ связаны в кольцо опроса.

Отношение $EvConn \subseteq FB \times FB$ определяет событийные связи между ФБ как целыми единицами. Обозначим pre_{fb} – множество предшественников блока fb по отношению $EvConn$.

Предикат $activeEI(ei_j)$ определяет, является ли событийный вход ei_j активным. Сигнал на активном входе подлежит обязательной обработке.

Функция $\tau^j: EI^j \rightarrow N \cup \{\omega\}$ определяет времена прибытия (порядковые номера) сигналов на событийных входах блока fb_j . В дальнейшем для простоты верхний индекс будет опускаться. Если $\tau(ei_k) = \omega$, то считается, что на событийной линии ei_k сигнал отсутствует. В каждый новый момент модельного времени локальные часы для регистрации входных сигналов в системе сбрасываются в ноль.

Циклические модели выполнения

В циклической модели выполнения по порядку активизируются все ФБ независимо от того, разрешены они или нет. Следует заметить, что активизация неразрешенного ФБ не влияет на правильность функционирования всей системы, но может замедлить ее работу за счет выполнения интерпретатором «пустых» операций по активизации и деактивизации ФБ.

Циклическую модель выполнения можно определить следующей функцией возбуждения: $activeFB(fb_j) = \exists fb_i \in FB [activeFBPrev(fb_i) \ \& \ (fb_i, fb_j) \in PoolOrder]$.

Циклическая модель выполнения с пропуском неразрешенных ФБ определяется следующим образом:

$$activeFB(fb_j) = enabled(fb_j) \ \& \ (\exists fb_i \in FB_{ap} [\exists s = (fb_i, fb_{i+1}, \dots, fb_j) \ [\forall k \in \{i, i+1, \dots, j-1\} [(f_k, f_{k+1}) \in PoolOrder] \ \& \ |s| > 2 \rightarrow \forall m \in \{i+1, \dots, j-1\} [-enabled(fb_j)]]] \vee \exists fb_i \in FB_{ap} \ \& \ \exists fb_i \in FB_e [pr(fb_i) > pr(fb_j)]].$$

В соответствии с этой функцией блок fb_j является активным, если он является разрешенным и при этом между предыдущим активным ФБ fb_i и данным ФБ fb_j в списке опроса существует последовательность s (возможно, пустая) из неразрешенных ФБ, или если вообще в предыдущий момент модельного времени не было активизировано ни одного ФБ, но при этом в текущий момент времени блок fb_j стал самым приоритетным разрешенным ФБ. С этого ФБ и начинается новый цикл опроса.

Последовательная модель выполнения

В модели выполнения на основе последовательной гипотезы первым запускается тот ФБ, на который первым пришел сигнал. При активизации ФБ сигналы с его выходов выдаются в том же порядке, в каком они были сгенерированы во время выполнения ФБ. Данная модель выполнения предполагает построение последовательностей EOS , EIS и OF . Следует заметить, что при построении последовательности EIS на основе EOS для избегания неопределенности следует учитывать дополнительную информацию, например, при-

ритетность ФБ или выходных линий ФБ. Рассмотрим пример на рис. 3. Пусть $EOS(fb1) = (eo2, eo1, eo3, eo2)$ и $pr(fb4) > pr(fb3)$. Тогда $EIS(fb1) = (fb4.ei1, fb3.ei1, fb2.ei1, fb4.ei2, fb4.ei1, fb3.ei1)$ и, соответственно, $OF(fb1) = (fb4, fb3, fb2, fb4, fb4, fb3)$. В выражении для EIS для идентификации входных сигналов использовалась точечная нотация.

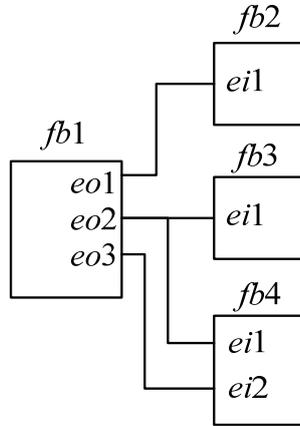


Рис. 3. Структура взаимосвязей ФБ-источника и ФБ-приемников

Последовательная модель выполнения может быть определена следующим образом:

$$activeFB(fb_j) = \exists fb_i \in pre_{fb_j} [fb_j \in OF(fb_i) \ \& \ (\exists fb_k \in OF(fb_i) [activeFBPrev(fb_k) \ \& \ fb_j = next(fb_k)]) \vee activeFBPrev(fb_i) \ \& \ first(OF(fb_i), fb_j) = true].$$

В соответствии с этим определением блок fb_j является активным, если он имеет предшественника fb_i , у которого в последовательности OF он стоит непосредственно после ближайшего в прошлом активного блока fb_k , или если блок fb_i сам являлся в ближайшем прошлом активным блоком и при этом блок fb_j стоит в его списке OF первым.

Синхронные модели выполнения

В классической синхронной однократной модели в каждый момент модельного времени выполняются все разрешенные ФБ:

$$activeFB(fb_j) = enabled(fb_j).$$

Недостатком данной модели является неопределенность при одновременном выполнении связанных событийными линиями разрешенных ФБ. При этом при псевдопараллельном выполнении ФБ результат будет зависеть от порядка выполнения этих ФБ, а при истинном параллельном выполнении – от скоростей интерпретации каждого из ФБ. Для исключения подобных ситуаций используются двухтактные схемы [8].

В синхронной модели с использованием частичного порядка срабатывания в каждый момент модельного времени активизируются только наиболее предпочтительные разрешенные ФБ:

$$activeFB(fb_j) = enabled(fb_j) \ \& \ \bar{\exists} fb_i \in FB [enabled(fb_i) \ \& \ (fb_i, fb_j) \in Pref].$$

Рассмотрим следующий пример. Пусть отношение предпочтения $Pref$ задано в виде диаграммы Хассе на рис. 4. Тогда если разрешены все ФБ $fb1...fb8$, то будет активизирован только один блок $fb1$. Если же разрешены все ФБ, кроме $fb1$, то одновременно будут активизированы блоки $fb2, fb3$ и $fb4$.

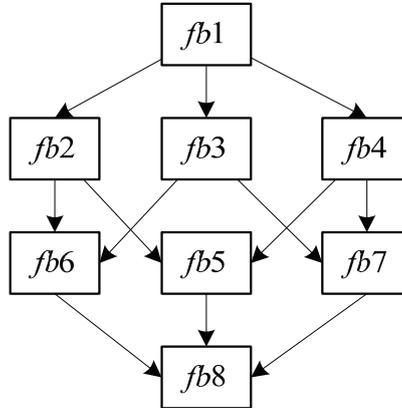


Рис. 4. Диаграмма Хассе, определяющая отношение предпочтения ФБ

Синхронную модель с использованием приоритетных уровней можно считать модификацией предыдущей модели. В ней одновременно активизируются только наиболее приоритетные разрешенные ФБ:

$$activeFB(fb_j) = enabled(fb_j) \& \bar{\exists} fb_i \in FB [enabled(fb_i) \& pr(fb_i) > pr(fb_j)].$$

Синхронная модель выполнения с явным группированием предполагает разбиение ФБ на группы G_1, G_2, \dots, G_n и активизацию блоков целыми группами. Возможно вхождение одного ФБ в разные группы, т.е. возможно, что $G_i \cap G_j \neq \emptyset$. В группе ФБ может выделяться один или несколько «лидеров» группы. Можно определить следующие условия разрешенности группы:

- а) разрешены все члены группы;
- б) разрешен один из лидеров группы;
- в) разрешены все лидеры группы;
- г) условие в виде произвольного логического выражения.

Одновременно может быть разрешено несколько групп, что определяет конфликтную ситуацию. Возможны следующие пути разрешения конфликтов:

- а) на основе приоритетов групп;
- б) на основе максимального числа разрешенных ФБ в группах;
- в) на основе максимального числа разрешенных ФБ-лидеров в группах

и т.д.

Синхронные модели на основе произвольных функций возбуждения являются наиболее общими моделями. При этом функции возбуждения представляются в виде логических выражений, включающих предикаты типа $enabled, activeFBPrev$, а также любые другие предикаты, связанные с объектами времени интерпретации, определенными выше. С помощью подобных логических выражений можно задать практически любую модель выполнения.

В отличие от выражений для предиката *activeFB*, используемых для спецификации моделей, логические выражения должны быть четко определены с вычислительной точки зрения и выполняться за относительно короткое время. Обозначим x_1, x_2, \dots, x_m – значения предикатов, используемых в логических выражениях. Тогда модель выполнения определяется выражениями вида

$$activeFB(fb_i) = F_i(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1)$$

для $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, где F_i – функция в виде логического выражения.

В качестве примера рассмотрим реализацию синхронной модели на основе частичного порядка с помощью логических выражений. В функцию возбуждения включаются конъюнкция инверсных значений предикатов разрешенности тех ФБ, которые предпочтительнее данного ФБ. Для блока *fb5*, приведенного в примере, представленном на рис. 4, можно определить следующую функцию возбуждения: $activeFB(fb5) = enabled(fb5) \& \neg enabled(fb1) \& \neg enabled(fb2) \& \neg enabled(fb4)$.

Модели на основе произвольных функций возбуждения могут быть довольно запутанными и содержать ошибки. Для проверки некоторых условий корректности данных моделей можно решать системы булевых уравнений на основе выражений типа (1). Например, для того чтобы узнать, при каких условиях в системе не будет ни одного активного ФБ, следует решить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} F_1(x_1, x_2, \dots, x_m) &= false \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_m) &= false \\ &\dots \\ F_n(x_1, x_2, \dots, x_m) &= false \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для того чтобы найти условие, при котором модель выполнения будет последовательной (т.е. когда в любой момент модельного времени будет активным один ФБ), можно решить уравнение (3):

$$\begin{aligned} &F_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \& \neg F_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \& \dots \& \neg F_n(x_1, x_2, \dots, x_m) \vee \\ &\neg F_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \& F_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \& \dots \& \neg F_n(x_1, x_2, \dots, x_m) \vee \\ &\dots \vee \neg F_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \& \neg F_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \& \dots \& F_n(x_1, x_2, \dots, x_m) = true. \end{aligned} \quad (3)$$

По всей видимости, для оптимизации моделей выполнения также будут полезны методы целочисленного линейного и динамического программирования.

3. Обработка входных сигналов в моделях выполнения

Обработка входных сигналов (в базисных ФБ) является одним из самых дискуссионных и «скользких» моментов в моделях выполнения ФБ. Это связано прежде всего с тем, что сам стандарт не определяет полноценный цикл входных сигналов, это особенно касается тех моментов, которые связаны с их удалением. Попробуем еще раз выделить типовые ситуации, возникающие на событийных входах базисных ФБ, а также пути их решения.

«Хорошая» ситуация, однозначно интерпретируемая стандартом ИЕС 61499 и не вызывающая проблем в моделях выполнения ФБ, приведена на

рис. 5. Это случай, когда на один из событийных входов поступает сигнал, и при этом существует разрешенный переход в диаграмме ЕСС, помеченный этим сигналом.

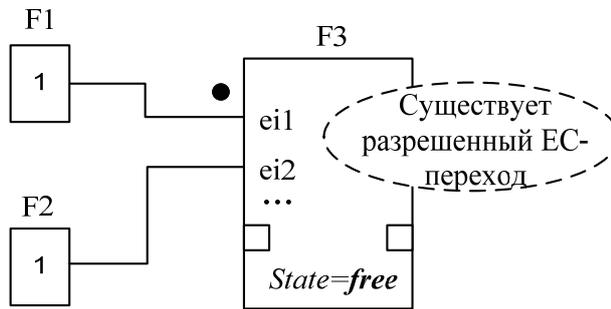


Рис. 5. Однозначная ситуация с входными сигналами

Если предположить параллельное асинхронное функционирование ФБ, которое покрывает все возможные сценарии развития событий в системе ФБ, то кроме «хорошей» ситуации, представленной на рис. 5, возможны и другие ситуации, которые, однако, вызывают различные трактовки у разных исследователей. Назовем эти ситуации проблемными. Схематичное представление подобных ситуаций приведено на рис. 6. На данном рисунке состояние операционного автомата (*OSM*) обозначено как *State*. Значение *free* («свободно») соответствует состоянию *s0* автомата *OSM*, а состояния *busy* («занято») – состояниям *s1* или *s2* автомата *OSM* [1].

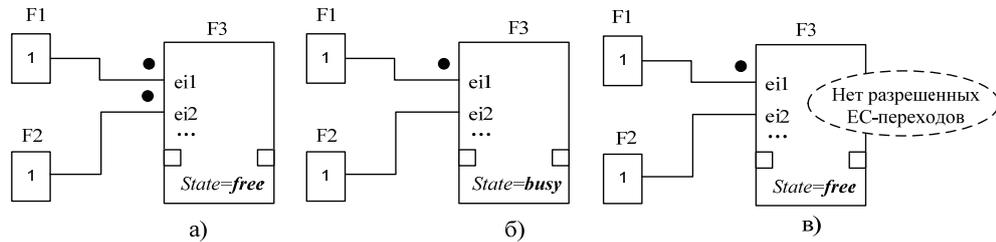


Рис. 6. Проблемные ситуации с входными сигналами: а – одновременный приход сигналов на входы ФБ (ситуация 1); б – приход сигнала на занятый ФБ (ситуация 2); в – приход сигнала на незанятый ФБ, когда его обработка не предусмотрена в *ЕСС* (ситуация 3)

Ситуация 1 (рис. 6,а), когда на входы ФБ одновременно приходят несколько сигналов, является маловероятной, но возможной. Более вероятной является ситуация 2 (рис. 6,б), когда в занятом состоянии на ФБ приходит сигнал. И чем больше реальная продолжительность выполнения алгоритмов, тем более вероятна данная ситуация. Ситуацию 3 можно считать типовой и она встречается на практике очень часто. Не рассматриваются отдельно ситуации 2 и 3 в случае прихода нескольких сигналов, поскольку это не меняет сути дела. Также особо не рассматривается ситуация, когда на один событийный вход приходит два (или более) сигнала с разных направлений, поскольку событийный вход с несколькими входящими событийными линиями можно заменить на эквивалентную конструкцию, содержащую стандартный ФБ

E_MERGE. В этом случае данная ситуация трансформируется в ситуацию 1. Ситуация, когда на один и тот же событийный вход одновременно приходят два (или более) различных сигнала с одной и той же событийной линии, является логически бессмысленной. В этом случае «серия» из нескольких сигналов может быть представлена одним сигналом (хотя возможны другие варианты).

Для обеспечения детерминизма поведения системы ФБ модель выполнения призвана поддерживать только один из сценариев развития событий в системе. Исходя из фактора возможности проблемных ситуаций, приведенных выше, их следует рассматривать (а не игнорировать рассмотрение) в моделях выполнения ФБ, в которых они возникают. Однако следует заметить, что не все модели выполнения предполагают наличие всех перечисленных ситуаций. Например, в модели выполнения на основе последовательной гипотезы в принципе невозможна ситуация 1.

Рассмотрим возможные пути решения проблемных ситуаций. По ситуации 1 имеются следующие варианты обработки входных событий ФБ:

1. По какому-либо правилу выбирается один (активный) входной сигнал, который будет в дальнейшем обрабатываться, а другие сигналы удаляются:

$$\forall ei \in EI \setminus ei_a \{ZEI(ei) = 0\}.$$

Здесь под ei_a обозначен событийный вход, на котором находится активный сигнал, а в фигурные скобки заключены исполняемые действия. Потерю сигнала можно считать недостатком этого правила, поскольку по сути дела теряется (возможно, важная) информация.

2. Обрабатываются все входные сигналы, но по одному, в порядке предпочтительности. Фаза активности ФБ включает обработку всех входных сигналов последовательно, один за другим.

3. Обрабатывается один (активный) сигнал, выбираемый по определенному правилу, а остальные не трогаются (сохраняются). После обработки этого сигнала могут выполняться другие разрешенные ФБ. Фаза активности ФБл включает обработку одного сигнала.

Возможны следующие варианты выбора активного сигнала:

1) по приоритету входной событийной линии. При этом предикат выбора определяется как

$$activeEI(ei_j) = ZEI(ei_j) = 1 \ \& \ \bar{\exists} ei_k \in EI [pr(ei_k) > pr(ei_j)];$$

2) по времени поступления сигнала:

$$activeEI(ei_j) = ZEI(ei_j) = 1 \ \& \ \bar{\exists} ei_k \in EI [\tau(ei_k) < \tau(ei_j)];$$

3) по наличию и объему действий, связанных с входным сигналом. При этом в первую очередь обрабатываются сигналы, связанные с *ЕС*-переходами, выходящими из текущего состояния, поскольку эти сигналы могут вызвать самые крупные активности в работе ФБ – переходы из одного состояния *ЕСС* в другое, а также связанные с этим возможные *ЕС*-акции. Во вторую очередь обрабатываются сигналы, связанные только со съемом данных. Остальные сигналы заведомо являются «пустыми» в плане связанных с ними действий. Следует отметить, что перечисленные выше три правила выбора могут комбинироваться.

Для решения ситуации 2 возможны следующие варианты обработки входного сигнала: 1) сигнал на входе уничтожается; 2) сигнал на входе сохраняется. Можно предполагать, что стандарт скорее склоняется к варианту 1, в то время как черновик стандарта был ориентирован на вариант 2, поскольку в нем вводились очереди сигналов единичной длины (так называемые *EI*-переменные). Ситуация 3 может решаться теми же двумя способами, что и ситуация 2, т.е. сигнал на входе или уничтожается, или нет. Скорее всего, в стандарте предполагался первый вариант, Основанием для этого является табл. 1 стандарта IEC 61499 [1].

Заключение

В работе предпринята попытка формализации моделей выполнения на основе функций возбуждения, а также рассмотрены вопросы обработки входных событий. В качестве подхода к унифицированному описанию операционной семантики модели ФБ в совокупности с моделями выполнения возможно использование машин абстрактных состояний, предложенных Ю. Гуревичем [8].

Список литературы

1. International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture / International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005. – 111 p.
2. **Vyatkin, V.** The IEC 61499 Standard and its Semantics / V. Vyatkin // IEEE Industrial Electronics Magazine. – V. 3, № 4. – 2009. – P. 40–48.
3. **Дубинин, В. Н.** Модели последовательного выполнения функциональных блоков IEC 61499 на основе динамически изменяемых приоритетов / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 13–22.
4. **Yoong, L. H.** A Synchronous Approach for IEC 61499 Function Block Implementation / L. H. Yoong, P. S. Roop, V. Vyatkin, Z. Salcic // IEEE Transactions on Computers. – 2009. – V. 58 (12). – P. 1599–1614.
5. **Дубинин, В. Н.** Разработка интегрированной параметризованной модели выполнения функциональных блоков IEC 61499 с использованием морфологических методов / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // Современные информационные технологии : сб. статей Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2008. – Вып. 7. – С. 146–154.
6. **Дубинин, В. Н.** Формализованное описание и моделирование систем функциональных блоков IEC 61499 / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер. Технические науки. – 2005. – № 5. – С. 76–89.
7. **Котов, В. Е.** Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
8. **Gurevich, Y.** Evolving Algebras 1993: Lipari Guide / Y. Gurevich // Specification and Validation Methods. – Oxford University Press, 1995. – P. 9–36.

Дубинин Виктор Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет

E-mail: victor_n_dubinin@yahoo.com

Dubinin Viktor Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of computer science, Penza State University

Вяткин Валерий Владимирович

доктор технических наук, профессор,
факультет электронных и компьютерных
наук, Оклендский университет
(г. Окленд, Новая Зеландия)

E-mail: victor_n_dubinin@yahoo.com

Vyatkin Valery Vladimirovich

Doctor of engineering sciences, professor,
department of electronics and computer
science, Auckland University
(Auckland, New Zealand)

УДК 004.423.4

Дубинин, В. Н.

**Формализация моделей выполнения функциональных блоков
ИЭС 61499 / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведе-
ний. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 12–23.**

ДИАЛОГОВАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РАЗРАБОТКИ ТЕКСТОВОЙ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Аннотация. Рассматривается диалоговая информационная система, являющаяся частью интегрированной информационной среды производственного предприятия и предназначенная для разработки текстовой конструкторской документации на специализированное технологическое оборудование. Приведены структура и основные функции системы.

Ключевые слова: рабочая конструкторская документация, информационная поддержка, автоматизированное составление текста, требования безопасности, критичность, риск.

Abstract. The article considers interactive information system being a component of industrial enterprise integrated information environment. The system is intended for development of technical documentation for special-purpose process equipment. The authors also describe system's structure and functionality.

Key words: design documentation, data support, computer-aided text generation, safety specification, criticality, hazard.

Введение

Разработка образцов технологического оборудования для опасных производств (далее изделия) характеризуется жесткими требованиями и высокой ответственностью за качество изделий. При этом разработчики сталкиваются с такими проблемами, как:

- сжатые сроки разработки;
- отсутствие типовых проектов;
- отсутствие развернутых требований технического задания;
- недостаточность требований нормативных документов;
- отсутствие возможности проведения испытаний изделия в полном объеме (как правило, испытания проводятся только для составных частей, а испытания на воздействие специальных факторов исключаются);
- ограниченность ресурсов при пуске-наладке изделия.

В данных условиях исключительную ответственность приобретают этапы проектирования и разработки рабочей конструкторской документации на изделие (РКД). Разработка конструкторской документации должна проводиться оперативно и на высоком техническом уровне, так как длительное согласование и последующие изменения РКД недопустимы.

Как заказчики, так и исполнители заказов едины во мнении, что для эффективного решения существующих проблем принципиально необходимы CALS-методологии и технологии.

В настоящей работе рассматривается диалоговая информационная система (ДИС), предназначенная для автоматизированной разработки следующих текстовых конструкторских документов: расчет (РР); программа и методика испытаний (ПМ); инструкция по монтажу, пуску, регулированию и обкатке (ИМ); руководство по эксплуатации (РЭ) (далее документы).

Документы оформляются в соответствии со стандартами ЕСКД [1, 2], общие характеристики документов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Общие характеристики текстовых конструкторских документов

Вид документа	1	2	3	4
	Определение и назначение документа	Основные разделы документа. Объекты документирования	Общие требования к документированию	
РР	Документ, содержащий расчетные данные, необходимые для уточнения требований к конструкции изделия, подтверждения соответствия конструкции требованиям ТЗ	Входные данные. Постановка задачи расчета. Математические модели и методы расчета. Промежуточные результаты. Выходные данные	Обоснование адекватности математических моделей и области их применения. Обеспечение достоверности и прослеживаемости результатов расчета. Полнота и адекватность документирования расчета	
ПМ	Документ, содержащий сведения, необходимые для обеспечения организации, проведения и документирования испытаний, подтверждения соответствия изделия и его готовности к поставке	Цели, общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний; требования безопасности; определяемые показатели и точность их измерения; режимы испытаний изделия; методы испытаний и измерений (методика); отчетность (в соответствии с ГОСТ 2.106) [1]	Полнота и адекватность документирования требований к процессам испытаний. Полнота и адекватность документирования организационного, технического и метрологического видов обеспечения процессов испытаний. Обоснование эффективности процессов	
ИМ	Документ, содержащий сведения, необходимые для выполнения монтажа, наладки, пуска, регулировки, обкатки и сдачи изделия и его составных частей в эксплуатацию на месте его применения	Цели, общие указания; меры безопасности; процессы: подготовка изделия к монтажу и стыковке; монтаж; наладка, стыковка и испытания; пуск; регулирование; комплексная проверка; обкатка; сдача смонтированного и стыкованного изделия в эксплуатацию (в соответствии с ГОСТ 2.610) [2]	Полнота и адекватность документирования требований к процессам монтажа, наладки, пуска, регулировки, обкатки и сдачи изделия. Полнота и адекватность документирования организационного, технического и метрологического видов обеспечения. Обоснование эффективности процессов	

Окончание табл. 1

1	2	3	4
РЭ	Документ, содержащий сведения, необходимые для обеспечения безопасной эксплуатации изделия в течение заданного срока	Цели, общие указания, меры безопасности, описание конструкции и работы изделия, правила использования изделия по назначению, требования к техническому обслуживанию, хранению, транспортированию и утилизации (в соответствии с ГОСТ 2.610)	Полнота и адекватность документирования требований к процессам эксплуатации, технического обслуживания, хранения, транспортированию и утилизации. Полнота и адекватность документирования организационного, технического и метрологического видов обеспечения

Разработка и внедрение ДИС преследует следующие цели:

– обеспечение системности, комплексности, полноты, адекватности и эффективности документированных требований к процессам жизненного цикла изделия (ЖЦИ), что в целом обеспечивает приемлемые риски разработки [3];

– сокращение сроков разработки и актуализации текстовой конструкторской документации;

– обучение и повышение квалификации персонала.

Методическое и программное обеспечение ДИС направлено на реализацию экспертной технологии разработки документов по критерию допустимой критичности, соответствующей допустимому риску изделия [4].

1. Информационная поддержка построения модели риска изделия

Построению модели риска изделия предшествует разработка функциональных и информационных моделей процессов ЖЦИ «какими они должны быть». Разработка осуществляется с применением инструментария VProWin.

Модель рисков изделия строится в соответствии с определением структуры его критичности [4]:

$$R = \sum_i C_i^I, C_i^I = \sum_j C_{ij}^{II}, C_{ij}^{II} = \sum_k C_{ijk}^{III}, \quad (1)$$

где $C_i^I, C_{ij}^{II}, C_{ijk}^{III}$ – значения критичности элементов I, II и III уровней соответственно.

К элементам I уровня относят отдельные инциденты, возможные при эксплуатации изделия. С целью оценивания критичностей инцидентов C_i^I предусмотрена возможность подключения к программному комплексу HAZARD 3.0 [5].

К элементам II уровня относят возможные:

– опасности изделия (опасные состояния, несоответствия, отказы составных частей (СЧ), узлов изделия, их соединений (стыковок), деталей);

– опасности средств локализации инцидентов (несоответствия, отказы средств защиты);

– опасности мониторинга и управления (несоответствия, ошибки мониторинга и регулирования, отказы исполнительных механизмов и средств управления);

– несоответствия, ошибки технического обслуживания.

К элементам III уровня относят возможные несоответствия, ошибки этапов жизненного цикла изделия: проектирования, изготовления, технического контроля, испытаний, монтажа, наладки, регулировки, пуска, обкатки, эксплуатации и ремонта.

В качестве непосредственных причин данного уровня рассматривают неадекватные данные, отсутствие требований, когда они необходимы, а также неадекватные требования РКД. В свою очередь данные причины разделяют на четыре классификационные группы:

а) причины, обуславливающие опасности, несоответствия и дефекты конструкции изделия;

б) причины, обуславливающие неадекватность доказательств соответствия изделия на этапах его жизненного цикла;

с) причины, обуславливающие неадекватность ресурсов по обеспечению эффективной и безопасной эксплуатации изделия;

д) причины, обуславливающие неадекватность процедур по выполнению этапов жизненного цикла изделия.

Следует отметить, что недостатки, ошибки документов РР, ПМ, ИМ, РЭ являются большей частью причин, отнесенных к группам *b, c, d*.

При разработке документов их критичность в соответствии с (1) структурно связывается с приемлемым риском изделия.

Информационная поддержка ДИС при построении модели рисков изделия заключается:

– в автоматизированном классифицировании разрабатываемого изделия как технологического оборудования;

– в идентификации методов и средств обеспечения и управления изделием при эксплуатации;

– в идентификации возможных инцидентов и опасностей конструкции изделия;

– в автоматизированном классифицировании причинно-следственных связей опасностей;

– в идентификации возможных несоответствий, ошибок при документировании процессов (процедур) технического контроля, испытаний, пусконаладочных работ, обкатки и эксплуатации изделия;

– в информационном поиске данных об изделиях-аналогах и соответствующих документах РР, ПМ, ИМ, РЭ.

Таким образом, информационная поддержка ДИС направлена на обеспечение соответствующей информационной среды и достаточной полноты входных данных для разработки документов по критерию приемлемой критичности.

2. Структурирование содержания разрабатываемого пакета документов

Основными задачами ДИС при структурировании являются:

1) информационная поддержка в части регламентирования подготовки полного набора входных данных об объектах документирования и требований к разработке документов;

2) автоматизация разработки:

– дерева целей документирования на уровне отдельных разделов документов;

– структур (содержаний) отдельных разделов документов в соответствии с деревом целей и требованиями нормативных документов;

3) декомпозиция информационной модели рисков изделия в соответствии с разделами документов, охватывающая группы причин *b, c, d*;

4) формирование структуры и классифицирование структурных элементов отдельных разделов разрабатываемых документов;

5) идентификация информационных связей (входов и выходов) отдельных разделов и документов в целом;

6) формальный анализ соответствия структуры на уровне содержаний и информационных связей пакета документов требованиям системности, комплексности, адекватности, отсутствия дублирования;

7) автоматическое составление перечней возможных критических недостатков, несоответствий, ошибок отдельных разделов и документов в целом; выработка рекомендаций по их предупреждению.

3. Информационная подготовка и построение информационных моделей объектов документирования

Информационная подготовка предусматривает сбор и систематизацию данных (в соответствии с результатами структурирования), полно и системно характеризующих объекты документирования соответствующих разделов документов.

Информационные модели разделов проектов документов оформляются в виде специально разработанных информационных карт, предназначенных для последующего формального составления текстов и анализа документов на соответствие. Автоматический выбор формы той или иной информационной карты осуществляется из специально разработанной библиотеки форм карт по следующим характеристическим признакам:

- наименование документа и его раздела;
- классификационные признаки изделия;
- объекты документирования в соответствии с разделом и классификационными признаками изделия (согласно ГОСТ 2.106, ГОСТ 2.610);
- требования нормативных документов к объектам документирования;
- дополнительные характеристики, определяемые результатами функционального и информационного моделирования процессов жизненного цикла изделия, результаты структурирования и информационной подготовки разработки документов (данные о морфологических и структурных моделях объектов документирования).

4. Автоматизированное создание отдельных документов

Данный этап предусматривает выполнение ДИС следующих функций разработки документа:

- регламентирование порядка разработки, оформления текстового документа с выдачей разработчику запросов (требований) по предоставлению полного набора входных данных для каждого раздела (если необходимо);
- информационная поддержка составления текстов отдельных структурных элементов разрабатываемого документа; поддержка заключается в информационном поиске и предоставлении разработчику фрагментов-аналогов ранее разработанных образцов текстовых документов в соответствии с результатами классифицирования структурных элементов с указаниями о возможности их использования (частичное или полное);
- автоматизированное составление текста директивных процедур в соответствии с входными данными – информационными моделями процессов жизненного цикла изделия; при этом ДИС выполняет функции САПР технологических процессов;
- анализ и уточнение информационных связей составленных текстов разделов документа.

В процессе разработки документа осуществляется автоматическая проверка и анализ проектов документов на соответствие требованиям системности, комплексности, полноты, адекватности и эффективности достижения целей документирования.

На основании результатов предыдущих этапов (информационного моделирования критичности изделия и структурирования пакета документов) ДИС автоматически проводит:

- автоматизированное классифицирование разработанных текстовых разделов документов;
- автоматическое формирование (согласно результатам классифицирования) комплексов характеристических признаков текстовых разделов документов, выбор соответствующих алгоритмов проверки;
- автоматическую (формальную) проверку текстовых разделов документов с целью выявления возможных недостатков, несоответствий, ошибок;
- идентификацию и формирование списков выявленных недостатков, несоответствий, ошибок для каждого раздела проекта документа; списки формируются на основании принятой классификации групп *b, c, d*.

Далее комплексы характеристических признаков и списки несоответствий, ошибок текстовых разделов документов анализируются и уточняются разработчиком документов. Установленные в результате анализа недостатки, несоответствия, ошибки устраняются в процессе доработки документов без участия ДИС.

5. Анализ и оценивание критичности проектов документов

Анализ и оценивание осуществляются с применением нечетких моделей системности, комплексности, полноты, адекватности и эффективности документированных требований РР, ПМ, ИМ, РЭ.

Критичность отдельных разделов документов, документов и пакета документов в целом оценивается в соответствии с результатами заполнения информационных карт документов в процессе информационной подготовки.

При оценивании ДИС:

- регламентирует процедуру нечеткого оценивания;
- осуществляет информационную поддержку и дает рекомендации при построении функций принадлежности информационных карт документов таким показателям документов, как полнота, адекватность и эффективность;
- выполняет автоматически фаззификацию, нечеткий вывод, дефаззификацию и, в конечном итоге, оценивание критичности каждого структурного элемента разрабатываемого документа.

Результатами оценивания являются оценки эффективности и критичности требований документов РР, ПМ, ИМ, РЭ. Качество разработанных документов считается удовлетворительным, если оценки их критичности не превышают установленную предельно допустимую величину (приемлемую критичность). Если оценки критичности отдельных структурных элементов неудовлетворительны, то соответствующие документы повторно и целенаправленно дорабатываются.

На рис. 1 приведена концептуальная информационная модель разработки документов. ДИС включает:

- базу знаний (БЗ);
- базы данных с системой управления (СУБД);
- модуль управления разработкой документов;
- специализированные модули разработки документа определенного вида (РР, ПМ, ИМ, РЭ);
- модуль анализа проектов документов;
- модуль импорта, осуществляющий информационное взаимодействие с рlm: Лоцман;
- модуль подготовки информации;
- справочники, включающие нормативную базу и каталоги изделий.

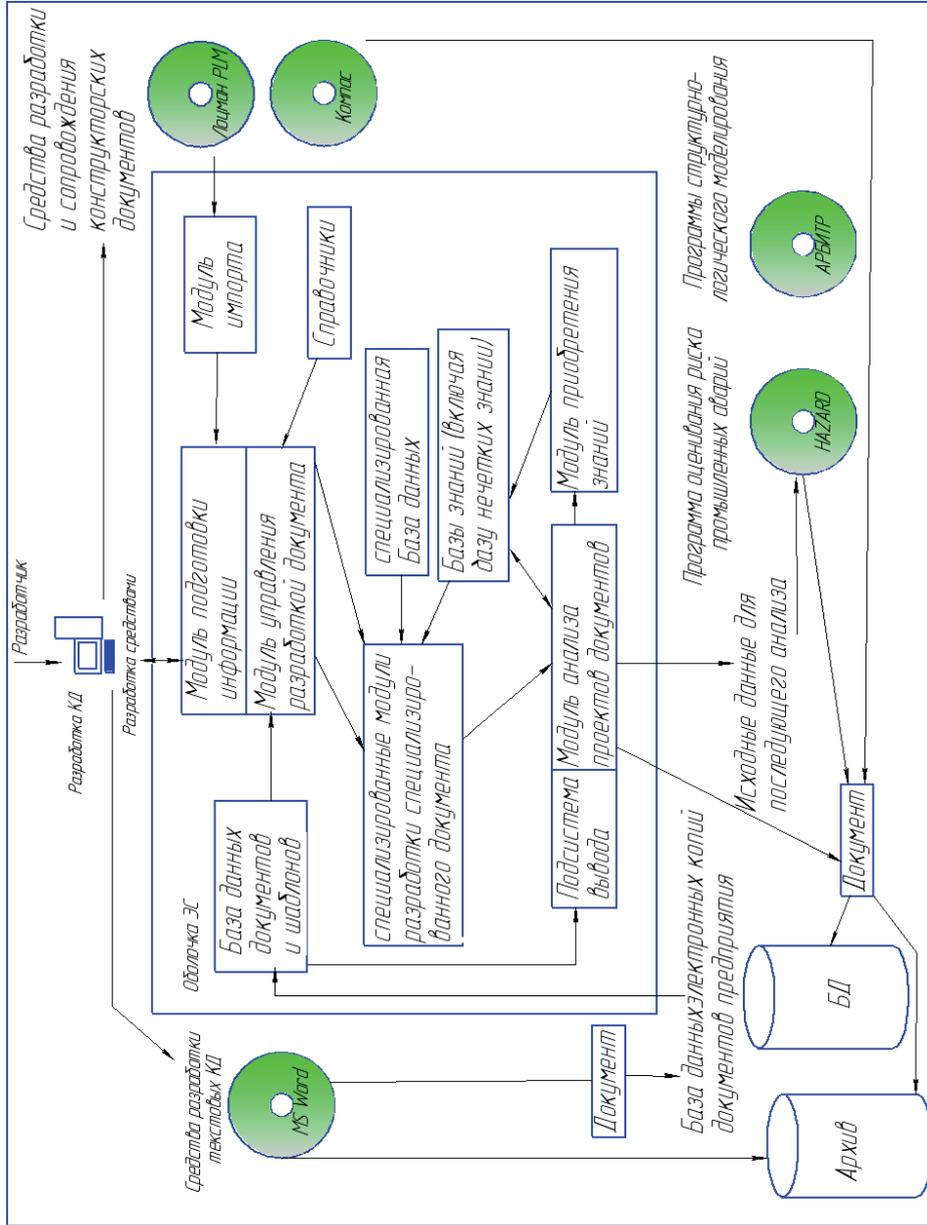


Рис. 1. Информационная модель разработки документов

Модуль управления разработкой документов объединяет специализированные модули в одну подсистему и хранит данные, используемые всеми специализированными модулями.

Специализированные модули функционируют как отдельные программные приложения, предназначенные в основном для извлечения конкретных данных из баз знаний. Они могут работать как в режиме разработки пакета документов, так и в автономном режиме (разработка соответствующего документа или его раздела).

Анализ развития интеллектуальных систем поддержки указывает на необходимость гибкой системы накопления знаний. Локальные информационные базы знаний не могут обеспечить достаточно оперативный и гибкий поиск решений, а также не могут выходить за рамки своей компетентности. Постоянное добавление знаний в процессе эксплуатации ДИС решает эту проблему. С этой целью разрабатывается автоматизированная подсистема сбора информации.

Оболочка ДИС используется в качестве интеллектуального посредника и выполняет следующие функции:

- настраивает комплекс программных приложений на решение определенных задач разработки и анализа;
- поддерживает взаимодействие пользователя с базой знаний;
- организует удобный диалог системы с пользователем, «ведет» его по этапам сбора – анализа данных и информации;
- осуществляет моделирование возможных ситуаций и обеспечивает поддержку при поиске оптимального решения задач.

Оболочка ДИС обеспечивает:

- предварительный анализ обрабатываемых данных об объектах документирования (по заданным алгоритмам);
- исключение ошибочных записей или суждений;
- предоставление данных для дальнейшего анализа в удобной форме.

Для уточнения суждений или данных могут быть использованы методы математической статистики, алгоритмы классифицирования (идентификации).

Анализ проводится в диалоговом режиме пользователя путем заполнения специальных форм или выбора требуемой информации из таблиц, входящих базу данных ДИС.

Оболочка ДИС предусматривает возможность автоматизированного расширения и систематизации знаний базы знаний и, следовательно, круга решаемых задач.

Основой программы-оболочки служит разработанный на языке программирования Delphi 7 модуль взаимодействия разных подпрограмм, он обеспечивает выполнение следующих функций:

- обеспечение взаимодействия с PLM Лоцман;
- работа с файлом проекта документа (файл, содержащий информацию о содержании документа, его каркас);
- обеспечение взаимодействия пользователя с ДИС (интерфейс);
- обеспечение взаимодействия между модулями системы;
- ведение разработок документов;
- классифицирование разработок с целью использования новых знаний.

База знаний ДИС представляет собой многоуровневую структуру, каждое поле которой объединяет накопленный опыт по характеристикам объектов документирования. Все поля баз знаний независимы, но связаны между собой общей структурой для формирования выводов и решений.

Специализированные базы данных содержат фиксированные информационные элементы, используемые при разработке документа (таблицы, перечни, константы и т.д.).

Данные об объектах документирования определяются и фиксируются путем заполнения полей в экранных формах или выбора характерных признаков в соответствующих таблицах базы данных. Уточнение данных проводится по результатам анализа влияния их изменений, результаты фиксируются по окончании диалога с пользователем.

Заключительный анализ данных и формирование выводов проводятся в автоматическом режиме без участия пользователя. Результаты анализа и выводы заносятся в базу данных и подключаются к базе решений для корректировки и внесения необходимых поправок.

Справочная информация вызывается в автоматизированном режиме (контекстная справка) или через справочный аппарат ДИС.

ДИС интегрирована в информационную среду предприятия и используется как навигатор в информационной среде предприятия. Она имеет доступ к электронному архиву предприятия (доступ к различным документам осуществляет по названиям (обозначениям), первым цифрам десятичного номера или по маркерам, прописываемым пользователем).

ДИС имеет интегрированную среду разработки отчетов FastReport, что позволяет сохранять и открывать документы в формате .fp3 с возможностью импорта в разные офисные продукты.

Заключение

В настоящее время ДИС реализована в виде модуля интегрированной информационной системы PLM:ЛОЦМАН предприятия ОАО НПП «Химмаш-Старт и выполняет функции информационной поддержки и структурирования при разработке документов РР, ПМ, ИМ, РЭ.

ДИС ориентирована на инженеров-конструкторов, специалистов ОТК и службы качества. Применение системы информационной поддержки дает предприятию возможность оперативно и качественно выполнять большой объем заказов на разработку комплексов технологического оборудования для опасных химических производств.

Список литературы

1. ГОСТ 2.106–96 «ЕСКД. Текстовые документы». ВНИИНМАШ Госстандарта России. – М., 1996. – 39 с.
2. ГОСТ 2.610–2006 «ЕСКД. Правила выполнения эксплуатационных документов». ВНИИНМАШ Госстандарта России. – М., 1996. – 37 с.
3. РД 033-418–01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов». Нормативный документ Росгортехнадзора России.
4. **Епишин, И. Г.** Экспертная технология управления риском при проектировании и разработке оборудования для опасных производств / И. Г. Епишин, С. М. Жмуркин, В. О. Трилисский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 193–202.

5. **Белов, П. Г.** Экспертная система оценки риска промышленных аварий и оптимизации мер безопасности на опасных производственных объектах / П. Г. Белов, А. И. Гражданкин, А. А. Федоров // Промышленная безопасность : материалы научного 15-го семинара. – М., 2008. – URL: <http://safety.mou.su/load/13>
-

Репин Андрей Юрьевич

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: ASAPR-snegovik@mail.ru

Repin Andrey Yuryevich

Postgraduate student,
Penza State University

Фионова Людмила Римовна

доктор технических наук, профессор,
декан факультета вычислительной
техники, Пензенский государственный
университет

E-mail: inoup@pnzgu.ru

Fionova Lyudmila Rimovna

Doctor of engineering sciences, professor,
dean of the faculty of computer
engineering, Penza State University

Епишин Игорь Георгиевич

кандидат технических наук, доцент,
начальник научно-исследовательской
лаборатории, ОАО НПП
«Химмаш-Старт» (г. Пенза)

E-mail: epishin.igor@yandex.ru

Epishin Igor Georgievich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, head of research
laboratory, Research Institute
“Khim mash-Start” plc. (Penza)

УДК 621.001.57

Репин, А. Ю.

Диалоговая информационная система разработки текстовой конструкторской документации / А. Ю. Репин, Л. Р. Фионова, И. Г. Епишин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 24–34.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ СОГЛАСОВАНИЯ

Аннотация. Предлагается комплексная методология проектирования устройств и систем логического управления сложными распределенными дискретными процессами с параллельным выполнением операций. Основное внимание при проектировании уделяется формальному описанию процессов и их свойств на основе концепции согласования процессов через пространство структурированной памяти. Даны рекомендации по аппаратной и программной реализации распределенных систем управления.

Ключевые слова: логическое управление, дискретные процессы, асинхронные предикатно-функциональные сети, формальные модели, распределенные вычислительные системы.

Abstract. The article suggests a comprehensive methodology for designing devices and systems of complex distributed discrete processes logic control with parallel execution of operations. In the course of design the author puts an emphasis on the formal description of processes and their properties based on the concept of process coordination through space-structured memory. The article provides recommendations for distributed control systems implementation in hardware and software.

Key words: logical control, discrete processes, asynchronous predicative-functional networks, formal models, distributed computer systems.

Введение

Семантика событийного и потокового асинхронного управления удобно и наглядно описывается в терминах асинхронных предикатно-функциональных (АПФС) и асинхронных предикатных (АПС) сетей. Под АПФС или АПС понимаются сети, состоящие из совокупности абстрактных машин, взаимодействующих через структурированную память – пространство функций и предикатов (АПФС) или пространство предикатов (АПС). Факты, описываемые атомарными константными формулами, представляют в моделируемой системе некоторые события. В данных сетях проверяются логические условия, представляющие собой, в свою очередь, логические функции от некоторых событий и являющиеся условиями готовности для других событий. Для решения задач моделирования дискретных систем в работах ряда авторов ранее были предложены различные обобщения и модификации сетей Петри. В данной работе при определении сетей АПФС и АПС использованы некоторые элементы теории машин абстрактных состояний Ю. Гуревича [1–3] (правила модификации функций и предикатов), систем алгоритмических алгебр В. М. Глушкова [4–6] (операция ветвления), продукционных систем и баз знаний [7, 8]. Используемая концепция построения сети абстрактных машин базируется на согласовании асинхронных процессов через разделяемую структурированную память (базу знаний) и в данной интерпретации с интеграцией концепций различных формализмов обладает элементами научной новизны, главный из которых – интеграция моделей искусственного интеллекта с моделями дискретных распределенных систем [9–11]. При формуль-

ном описании сетей АПФС и АПС частично используется нотация сетей абстрактных машин (СеАМ), введенная в работах [12, 13].

В целях унификации описания большинство из обобщений и модификаций сетей Петри могут быть формализованы сетями АПФС и АПС. Сети АПФС и АПС, берущие свои начала от машин Гуревича и Колмогорова – Шенхаге, моделируют машины Тьюринга [1–3]. Сетями АПФС могут быть описаны сети Петри с обычными, информационными и ингибиторными дугами. Сетями АПС могут быть описаны безопасные ингибиторные сети Петри [14], позиции в которых имеют смысл переменных высказываний.

Далеко не для всех модификаций и расширений сетей Петри разработаны методы обнаружения типовых ситуаций в дискретных системах (помимо универсальных методов анализа графа достижимых состояний), например, анализа взаимных блокировок. На предварительных этапах часто оказываются полезными методы статистического имитационного моделирования дискретных систем.

1. Логико-алгебраические спецификации и ситуационное управление в имитационных моделях распределенных дискретных систем

С помощью систем моделирования на ЭВМ реализуется метод имитационного моделирования, а в самих имитационных моделях отображаются структура и динамика проектируемой или исследуемой системы. Адекватность имитационной модели определяется степенью представления разработчика о функционировании системы, точностью определения или предсказания ее параметров. Системы моделирования дают возможность быстрой перестройки имитационных моделей при возникновении новых ситуаций, например, при изменении технического задания на разработку вычислительной системы или ее операционной системы, при изменении режима ее использования. В общем случае построение имитационной модели основано на задании отношения $R \subset \mathbf{P}(F) \times \mathbf{P}(F)$, где F – непустое множество ситуаций, а \mathbf{P} – символ булеана. Данное отношение устанавливает зависимость одних множеств ситуаций от других. На более детализированном уровне моделирования между ситуациями задается причинно обусловленное отношение непосредственного следования.

Сложность современных вычислительных систем и устройств, отсутствие во многих случаях близких по характеристикам и структуре прототипов приводят разработчиков к необходимости использования имитационных моделей различных уровней. Имитационные модели традиционно используются для предсказания характеристик производительности вычислительных систем. Значительно меньше внимания уделялось использованию имитационных систем как средства проектирования и дальнейшей проверки правильности функционирования вычислительных систем и устройств. Это можно объяснить тем, что системы моделирования с подходящим для целей инженерной практики входным языком появились сравнительно недавно.

Общим недостатком многих известных систем является то, что процесс составления модели близок к процессу обычного программирования и кодирования задач, что затрудняет составление и верификацию самих моделей. Отличительными признаками предлагаемой системы моделирования являются способы реализации языка моделирования и его синтаксиса, средств ре-

дактирования и интерпретации функций и предикатов, модулей, атрибутов активностей. Главной особенностью предлагаемой системы моделирования является то, что в ее основу положены механизмы реализации имитационных моделей на базе исполняемых логико-алгебраических спецификаций. Проиллюстрируем основные особенности использования подобного подхода, отмечая при этом, что его сфера применения шире, чем создание имитационных систем.

Выражения, которыми описывается функционирование аппаратно-программных модулей, удобны для преобразований и непосредственной интерпретации и могут быть использованы в качестве основы для реализации системы моделирования на основе концепции непосредственно интерпретируемых формальных спецификаций. Потенциально возможное использование многосортных логик и логик высших порядков позволяет плодотворным образом сочетать как декларативные, так и процедурные подходы к построению имитационных моделей распределенных систем логического управления. Построение имитационных, или поведенческих, моделей систем массового обслуживания базируется на согласованных взаимодействиях объектов через общее пространство – коммуникационную среду или общее пространство информационных объектов.

2. Примеры составления логических выражений для распределенных дискретных систем логического управления системами массового обслуживания

Рассмотрим некоторые подсистемы систем массового обслуживания, содержащие обслуживающие устройства (центры обслуживания или обработки запросов), входные и выходные очереди. Функционирование данных подсистем опишем логико-алгебраическими выражениями для сетей АПФС. Пусть, например, простая подсистема массового обслуживания включает две входные очереди f_1 и f_2 , центр обслуживания c_1 и одну выходную очередь f_3 . Рассмотрим три варианта, или дисциплины, обработки запросов в данной подсистеме и, соответственно, три логико-алгебраических выражения, описывающих данные варианты.

1. Дисциплина 1: в случае, если во входной очереди f_1 содержится не менее одного запроса, во входной очереди f_2 содержится два запроса, а выходная очередь f_3 пуста, то центр обслуживания c_1 выбирает на обработку один запрос из очереди f_1 и после обработки помещает ответ в очередь f_3 . Число запросов в очереди f_2 сохраняется неизменным. В дальнейшем будем использовать один термин «запрос» для обозначения запросов, заявок, ответов или других видов активностей. Работа центра обслуживания описывается следующей формулой:

$$c_1: [f_{ge}(f_1(a_1), 1) \& f_{eq}(f_2(a_2), 2) \& f_{eq}(f_3(a_3), 0)] \\ (\{f_1(a_1) \leftarrow f_{minus}(f_1(a_1), 1), f_3(a_3) \leftarrow 1\} \vee R^E),$$

где значениям унарных функций f_1 , f_2 и f_3 соответствуют длины одноименных очередей; f_{ge} и f_{eq} – бинарные предикаты сравнения на «больше или равно» и «равно»; f_{minus} – функция вычитания; R^E – тождественная модификация интерпретации текущей сигнатуры эволюционирующей алгебраической системы (пустая модификация) [12, 13].

2. Дисциплина 2: если во входной очереди f_1 имеется в наличии не менее одного запроса, во входной очереди f_2 – не менее двух запросов, а выходная очередь f_3 пуста, то из очереди f_1 выбирается на обработку один запрос, из очереди f_2 удаляются все запросы, а в выходную очередь f_3 добавляется один запрос. Описанные действия реализуются следующим модулем:

$$c_2: [f_{ge}(f_1(a_1), 1) \& f_{ge}(f_2(a_2), 2) \& f_{eq}(f_3(a_3), 0)](\{f_3(a_3) \leftarrow f_{plus}(f_3(a_3), 1), \\ f_1(a_1) \leftarrow f_{minus}(f_1(a_1), 1), f_2(a_2) \leftarrow 0\} \vee R^E),$$

где f_{plus} – функция сложения.

3. Дисциплина 3: если во входной очереди f_1 не менее двух запросов, в очереди f_2 – не менее четырех запросов, а в выходной очереди f_3 – не более пяти запросов, то из очереди f_1 выбирается на обработку один запрос, из очереди f_2 выбираются на обработку все запросы, а к содержимому выходной очереди добавляются все обработанные запросы. Логико-алгебраическое выражение имеет следующий вид:

$$c_3: [f_{ge}(f_1(a_1), 2) \& f_{ge}(f_2(a_2), 4) \& f_{le}(f_3(a_3), 5)](\{f_3(a_3) \leftarrow f_{plus}(f_3(a_3), \\ f_{plus}(f_1(a_1), f_2(a_2))\}); (f_1(a_1) \leftarrow f_{minus}(f_1(a_1), 1), f_2(a_2) \leftarrow 0\} \vee R^E),$$

где f_{le} – бинарный предикат сравнения на «меньше или равно».

Во всех трех приведенных выше примерах в случае, если хотя бы одно условие не выполняется, центр обслуживания простаивает и ожидает выполнения всех условий. В третьем примере символ точки с запятой, разделяющий правила обновления унарных функций, заключенные в фигурные скобки, является упрощенным символом темпоральной операции непосредственного следования, а символ простой запятой, разделяющей правила обновления во всех трех примерах, является упрощенным символом темпоральной операции возможной одновременности [12, 13]. В выражениях для модулей c_1 , c_2 и c_3 символы a_1 , a_2 и a_3 являются именами абстрактных агентов, интерпретирующих логико-алгебраические выражения. Агенты проверяют при этом значения предикатов и выполняют согласованные правила обновления интерпретации текущей сигнатуры. В каждом из выражений c_1 , c_2 и c_3 достаточно было бы использовать по одному агенту, но даже в таких несложных выражениях использование нескольких агентов может дать выигрыш во времени исполнения.

3. Логико-алгебраические выражения для распределенных систем логического управления с очередями

Рассмотрим далее логико-алгебраическую модель простой очереди «с проталкиванием», или с известной в теории массового обслуживания дисциплиной FIFO (First In – First Out). Данная дисциплина представлена сетью АПС M_1 и описывается следующей системой логико-алгебраических выражений:

$$m_1: [p_1(a_1) \& \neg p_2(a_2)](\{p_1(a_1) \leftarrow \text{false}, p_2(a_2) \leftarrow \text{true}\} \vee R^E);$$

$$m_2: [p_2(a_2) \& \neg p_3(a_3)](\{p_2(a_2) \leftarrow \text{false}, p_3(a_3) \leftarrow \text{true}\} \vee R^E);$$

...

$$m_i: [p_i(a_i) \& \neg p_{i+1}(a_{i+1})](\{p_i(a_i) \leftarrow \text{false}, p_{i+1}(a_{i+1}) \leftarrow \text{true}\} \vee R^E);$$

...

$$m_{n-1}: [p_{n-1}(a_{n-1}) \& \neg p_n(a_n)](\{p_{n-1}(a_{n-1})\} \leftarrow \text{false}, p_n(a_n) \leftarrow \text{true}) \vee R^E,$$

где унарные предикаты p_1, p_2, \dots, p_n используются для представления n мест для ожидания в очереди (символ p_n соответствует началу, или «голове», очереди), причем логика работы модулей построена таким образом, что каждый новый запрос стремится занять место, непосредственно примыкающее к месту, где находится предыдущих запрос. Унарным предикатам p_1, p_2, \dots, p_n и абстрактным агентам с именами a_1, a_2, \dots, a_n соответствуют информационные объекты и программно или аппаратно реализованные «конкретные» агенты. Последние, изменяя состояние информационных объектов, осуществляют перемещение запросов. В приведенном примере каждое место для ожидания представлено отдельным предикатом, причем область определения каждого предиката p_i содержит единственный элемент a_i . Рассмотрим случай, когда вся очередь представлена единственным унарным предикатом p , областью определения которого является множество имен абстрактных агентов $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Система выражений для сети АПС M_2 , описывающая подобную реализацию очереди FIFO, имеет следующий вид:

$$m'_1: [p(a_1) \& \neg p(a_2)](\{p(a_1)\} \leftarrow \text{false}, p(a_2) \leftarrow \text{true}) \vee R^E;$$

$$m'_2: [p(a_2) \& \neg p(a_3)](\{p(a_2)\} \leftarrow \text{false}, p(a_3) \leftarrow \text{true}) \vee R^E;$$

...

$$m'_i: [p(a_i) \& \neg p(a_{i+1})](\{p(a_i)\} \leftarrow \text{false}, p(a_{i+1}) \leftarrow \text{true}) \vee R^E;$$

...

$$m'_{n-1}: [p(a_{n-1}) \& \neg p(a_n)](\{p(a_{n-1})\} \leftarrow \text{false}, p(a_n) \leftarrow \text{true}) \vee R^E.$$

Предметные константы a_1, a_2, \dots, a_n в данном случае играют роль меток для процесса занятия мест для ожидания в очередях. Выбор конкретной системы выражений для программной или аппаратной реализации определяется требуемой производительностью системы массового обслуживания и затратами памяти на размещение объектов.

4. Особенности формализации систем с прерываниями в работе устройств

Для реализации дисциплин с прерыванием начавшегося обслуживания воспользуемся известным в вычислительной технике отношением прерывания $INT \subset Z \times Z$, где Z – множество запросов на обслуживание. Это иррефлексивное, транзитивное и антисимметричное отношение. Реализуя дисциплины обслуживания с прерываниями, в выражениях необходимо использовать правила обновлений одноименного предиката вида $INT(z_i, z_j) \leftarrow \text{true}$ (запрос z_i может прервать начавшееся обслуживание запроса z_j), а при запрете прерывания – правило $INT(z_i, z_j) \leftarrow \text{false}$. Отношение INT используется для указания на возможность прерывания. Для фиксации факта совершившегося прерывания можно использовать другое отношение $ISINT \subset Z \times Z$, модифицируя его с помощью правил вида $ISINT(z_i, z_j) \leftarrow \text{true}$ и $ISINT(z_i, z_j) \leftarrow \text{false}$. Здесь, как и ранее, предполагается, что отношение $ISINT$ представлено областью истинности одноименного предиката. Истинность высказывания $ISINT(z_i, z_j)$,

например, означает, что начавшееся исполнение или обслуживание запроса z_j прервано запросом z_i .

5. Формализация процессов занятия и освобождения ресурсов в распределенных системах логического управления

Процессы занятия и освобождения ресурсов в системах массового обслуживания могут быть также описаны логико-алгебраическими выражениями. Пусть P – множество процессов, R – множество ресурсов, RR и RU – бинарные предикаты вида

$$RR: P \times R \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}, RU: R \times P \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\},$$

где истинность высказывания вида $RR(p_i, r_j)$ означает, что процесс p_i затребовал ресурс r_j , а истинность высказывания вида $RU(r_j, p_i)$ означает, что ресурс r_j предоставлен в распоряжение процесса p_i .

Введем далее унарные предикаты:

$$PA: P \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}, RB: R \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\},$$

характеризующие активность процессов и занятость ресурсов соответственно.

Истинность высказывания $PA(p_i)$ означает активность процесса p_i , а истинность высказывания $RB(r_i)$ означает, что ресурс r_i занят каким-либо процессом.

Рассмотрим в качестве примера задачу, в которой процессу p_1 надо предоставить в распоряжение ресурсы r_1 и r_2 . Следующее логико-алгебраическое выражение для модуля M_r описывает процесс предоставления ресурсов одному процессу:

$$M_r: [PA(p_1) \ \& \ \neg RB(r_1) \ \& \ \neg RB(r_2) \ \& \ RR(p_1, r_1) \ \& \ RR(p_1, r_2)] \\ (\{RB(r_1) \leftarrow \text{true}, RB(r_2) \leftarrow \text{true}, RU(r_1, p_1) \leftarrow \text{true}, RU(r_2, p_1) \leftarrow \text{true}, \\ RR(p_1, r_1) \leftarrow \text{false}, RR(p_1, r_2) \leftarrow \text{false}\} \vee R^E).$$

6. Примеры формализации сложных взаимодействий процессов

В общем случае возможно возникновение и более сложных ситуаций при распределении ресурсов в сетях хранения и обработки данных. Например, ресурс может состоять из многих физических узлов и иметь несколько единиц, за разделяемое или монопольное использование которых конкурируют многие процессы; узлы сети, реализующие единицы абстрактного ресурса, могут использоваться другими процессами. Возникает проблема выбора стратегий ожидания или захвата единиц ресурса, проблема разрешения тупиковых ситуаций. Рассмотрим пример разрешения сложных ситуаций, возникающих при взаимодействии процессов в сети и являющихся следствием захвата и освобождения ресурсов.

Определим асинхронную унарную предикатную сеть (АУПС) N некоторых абстрактных (асинхронных) машин:

$$N = (P, R, A, M, I_0),$$

где P – множество унарных предикатов, образующих (модифицируемое) пространство согласования взаимодействий процессов и ресурсов; R – множе-

ство правил обновления (модификации) предикатов; A – множество некоторых символов (меток), отмечающих отдельные стадии выполнения процессов на различных узлах распределенной вычислительной системы или сети и интерпретируемых как предметные константы; M – множество абстрактных узлов (модулей) сети N , реализующих правила из R ; $I_0 = I(t_0)$ – начальная интерпретация предикатных символов, $t_0 > 0$. Продукционные правила R удобно представлять в виде α -дизъюнкций вида $[\alpha](r_1 \vee r_2)$ или $[\alpha](r_1 \vee r^E)$, принятых в системах алгоритмических алгебр Глушкова, где r^E – тождественное (пустое) правило модификации предиката. Правила модификации могут быть сгруппированы в блоки; также могут блокироваться и модули сети абстрактных машин в целях образования сложных составных модулей.

Пусть в вычислительной сети взаимодействуют процессы A, B, C, D и E , каждый из которых использует неразличимые единицы некоторого ресурса R с тремя единицами. Процессы A и B на основных фазах своей работы требуют все три единицы ресурса R , а каждому из процессов C, D и E требуется по одной (любой) из единиц ресурса R . Каждый из процессов может находиться в одной из трех циклически повторяемых фаз выполнения: фазе подготовки к потреблению (возобновляемого) ресурса, фазе потребления ресурса и в заключительной фазе. Система логико-алгебраических выражений для узлов (модулей) абстрактной сети АУПС N_1 , описывающая функционирование распределенной системы, имеет следующий вид:

– для процесса A :

$$A_1: [p_A(a_1) \& p_R(r_4)](\{p_A(a_1) \leftarrow \text{false}, p_A(a_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_4) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_a) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

$$A_2: [p_A(a_2) \& p_X(x_a)](\{p_A(a_2) \leftarrow \text{false}, p_A(a_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_5) \leftarrow \text{true}, p_X(x_a) \leftarrow \text{false}\} \vee r^E);$$

$$A_3: [p_A(a_3)](\{p_A(a_3) \leftarrow \text{false}, p_A(a_1) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

– для процесса B :

$$B_1: [p_B(b_1) \& p_R(r_4)](\{p_B(b_1) \leftarrow \text{false}, p_B(b_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_4) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_b) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

$$B_2: [p_B(b_2) \& p_X(x_b)](\{p_B(b_2) \leftarrow \text{false}, p_B(b_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_5) \leftarrow \text{true}, p_X(x_b) \leftarrow \text{false}\} \vee r^E);$$

$$B_3: [p_B(b_3)](\{p_B(b_3) \leftarrow \text{false}, p_B(b_1) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

– для процесса C :

$$C_1: [p_C(c_1) \& p_R(r_3)](\{p_C(c_1) \leftarrow \text{false}, p_C(c_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_c) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

$$C_2: [p_C(c_2) \& \neg p_R(r_1) \& p_X(x_c)](\{p_C(c_2) \leftarrow \text{false}, p_C(c_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_X(x_c) \leftarrow \text{false}\} \vee r^E);$$

$$C_3: [p_C(c_3)](\{p_C(c_3) \leftarrow \text{false}, p_C(c_1) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

– для процесса D :

$$D_1: [p_D(d_1) \& p_R(r_3)](\{p_D(d_1) \leftarrow \text{false}, p_D(d_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_d) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

$$D_2: [p_D(d_2) \& \neg p_R(r_1) \& p_X(x_d)](\{p_D(d_2) \leftarrow \text{false}, p_D(d_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_X(x_d) \leftarrow \text{false}\} \vee r^E);$$

$$D_3: [p_D(d_3)](\{p_D(d_3) \leftarrow \text{false}, p_D(d_1) \leftarrow \text{true}\} \vee r^E);$$

– для процесса E:

$$E_1: [p_E(e_1) \& p_R(r_3)](\{p_E(e_1) \leftarrow \text{false}, p_E(e_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_e) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

$$E_2: [p_E(e_2) \& \neg p_R(r_1) \& p_X(x_e)](\{p_E(e_2) \leftarrow \text{false}, p_E(e_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_X(x_e) \leftarrow \text{false}\} \vee \Gamma^E);$$

$$E_3: [p_E(e_3)](\{p_E(e_3) \leftarrow \text{false}, p_E(e_1) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

– для процесса управления хранением, распределением и возвращением единиц ресурса R:

$$R_1: [p_R(r_1) \& \neg p_R(r_2)](\{p_R(r_1) \leftarrow \text{false}, p_R(r_2) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

$$R_2: [p_R(r_2) \& \neg p_R(r_3)](\{p_R(r_2) \leftarrow \text{false}, p_R(r_3) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

$$R_3: [p_R(r_1) \& p_R(r_2) \& p_R(r_3)](\{p_R(r_1) \leftarrow \text{false}, p_R(r_2) \leftarrow \text{false}, p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_R(r_4) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

$$R_4: [p_R(r_5)](\{p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_R(r_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_5) \leftarrow \text{false}\} \vee \Gamma^E).$$

Здесь p_A, p_B, p_C, p_D, p_E – предикаты, используемые для представления соответствующих процессов; p_X и p_Y – входной и выходной предикаты, используемые для взаимодействия с операционной средой; область истинности данных предикатов изменяется в процессе работы сети, что соответствует фазам процесса. Изменение состояния ресурса R с несколькими единицами отображается областью истинности предиката p_R . Указанные предикаты составляют так называемое пространство согласования действий процессов. В процессе работы модели происходят согласованные взаимодействия модулей (узлов) предикатной сети.

Вводя приоритеты между процессами, возможно детерминизировать работу системы. Например, можно реализовать дисциплину обслуживания с относительными приоритетами без прерывания начавшегося обслуживания (потребления ресурса R), расставив приоритеты процессов в порядке убывания: A, B, C, D, E. Модифицированная система логико-алгебраических выражений для узлов (модулей) детерминированной абстрактной сети N'_1 , описывающая функционирование распределенной системы, имеет следующий вид:

– для процесса A:

$$A'_1: [p_A(a_1) \& p_R(r_4)](\{p_A(a_1) \leftarrow \text{false}, p_A(a_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_4) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_a) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

$$A'_2: [p_A(a_2) \& p_X(x_a)](\{p_A(a_2) \leftarrow \text{false}, p_A(a_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_5) \leftarrow \text{true}, p_X(x_a) \leftarrow \text{false}\} \vee \Gamma^E);$$

$$A'_3: [p_A(a_3)](\{p_A(a_3) \leftarrow \text{false}, p_A(a_1) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

– для процесса B:

$$B'_1: [\neg p_A(a_1) \& p_B(b_1) \& p_R(r_4)](\{p_B(b_1) \leftarrow \text{false}, p_B(b_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_4) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_b) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

$$B'_2: [p_B(b_2) \& p_X(x_b)](\{p_B(b_2) \leftarrow \text{false}, p_B(b_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_5) \leftarrow \text{true}, p_X(x_b) \leftarrow \text{false}\} \vee \Gamma^E);$$

$$B'_3: [p_B(b_3)](\{p_B(b_3) \leftarrow \text{false}, p_B(b_1) \leftarrow \text{true}\} \vee \Gamma^E);$$

– для процесса C:

$$C'_1: [\neg p_A(a_1) \& \neg p_B(b_1) \& p_C(c_1) \& p_R(r_3)](\{p_C(c_1) \leftarrow \text{false}, p_C(c_2) \leftarrow \text{true},$$

$$p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_c) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

$$C'_2: [p_C(c_2) \& \neg p_R(r_1) \& p_X(x_c)](\{p_C(c_2) \leftarrow \text{false}, p_C(c_3) \leftarrow \text{true}, \\ p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_X(x_c) \leftarrow \text{false} \} \vee \Gamma^E);$$

$$C'_3: [p_C(c_3)](\{p_C(c_3) \leftarrow \text{false}, p_C(c_1) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

– для процесса D:

$$D'_1: [\neg p_A(a_1) \& \neg p_B(b_1) \& \neg p_C(c_1) \& p_D(d_1) \& p_R(r_3)](\{p_D(d_1) \leftarrow \text{false}, \\ p_D(d_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_d) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

$$D'_2: [p_D(d_2) \& \neg p_R(r_1) \& \neg p_C(c_2) \& p_X(x_d)](\{p_D(d_2) \leftarrow \text{false}, p_D(d_3) \leftarrow \text{true}, \\ p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_X(x_d) \leftarrow \text{false} \} \vee \Gamma^E);$$

$$D'_3: [p_D(d_3)](\{p_D(d_3) \leftarrow \text{false}, p_D(d_1) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

– для процесса E:

$$E'_1: [\neg p_A(a_1) \& \neg p_B(b_1) \& \neg p_C(c_1) \& \neg p_D(d_1) \& p_E(e_1) \& p_R(r_3)] \\ (\{p_E(e_1) \leftarrow \text{false}, p_E(e_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_Y(y_e) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

$$E'_2: [p_E(e_2) \& \neg p_R(r_1) \& \neg p_C(c_2) \& \neg p_D(d_2) \& p_X(x_e)](\{p_E(e_2) \leftarrow \text{false}, \\ p_E(e_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_X(x_e) \leftarrow \text{false} \} \vee \Gamma^E);$$

$$E'_3: [p_E(e_3)](\{p_E(e_3) \leftarrow \text{false}, p_E(e_1) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

– для процесса управления хранением, распределением и возвращением единиц ресурса R:

$$R'_1: [p_R(r_1) \& \neg p_R(r_2)](\{p_R(r_1) \leftarrow \text{false}, p_R(r_2) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

$$R'_2: [p_R(r_2) \& \neg p_R(r_3)](\{p_R(r_2) \leftarrow \text{false}, p_R(r_3) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

$$R'_3: [p_R(r_1) \& p_R(r_2) \& p_R(r_3)](\{p_R(r_1) \leftarrow \text{false}, p_R(r_2) \leftarrow \text{false}, \\ p_R(r_3) \leftarrow \text{false}, p_R(r_4) \leftarrow \text{true} \} \vee \Gamma^E);$$

$$R'_4: [p_R(r_5)](\{p_R(r_1) \leftarrow \text{true}, p_R(r_2) \leftarrow \text{true}, p_R(r_3) \leftarrow \text{true}, p_R(r_5) \leftarrow \text{false} \} \vee \Gamma^E).$$

Полученная АУПС-модель распределенной системы логического управления относится к классу непосредственно исполняемых формальных спецификаций и может быть использована для моделирования и непосредственно при написании сетевых управляющих программ.

АУПС-сети могут использоваться и для представления известных [15] сетей с импульсными и потенциальными разрешающими сигналами. Описание импульсных и потенциальных сигналов можно формализовать, доопределив формализм АУПС двумя бинарными предикатами $IMP(x, y)$ и $POT(x, y)$, где предметные переменные x и y пробегает по множеству узлов сети (множеству абстрактных машин); эти сигналы могут быть реализованы в сети логического управления сообщениями, передаваемыми между модулями.

Аналогично определим асинхронную унарную предикатно-функциональную сеть (АУПФС):

$$Q = (P, F, B, C, R, A, M, I_0),$$

где F – множество унарных (модифицируемых) функций, совместно с унарными (модифицируемыми) предикатами из множества P образующих (модифицируемое) пространство согласования взаимодействий процессов и ресурсов; B – множество бинарных (стационарных) предикатов сравнения; C – множество бинарных (стационарных) арифметических функций; $I_0 = I(t_0)$ – начальная интерпретация предикатных и функциональных символов, $t_0 > 0$. Остальные множества соответствуют определенным ранее множествам для сети N . Унарность сети Q типа АУПФС определяется только унарными модифицируемыми функциями и предикатами. Полученная АУПФС-модель распределенной системы логического управления, так же как и предыдущая АУПС-модель, относится к классу непосредственно исполняемых формальных спецификаций и может быть использована для моделирования и непосредственно при написании сетевых управляющих программ.

В разд. 2, таким образом, были рассмотрены сети типа АУПФС, а в разд. 3 – сети типа АУПС. Примеры, рассмотренные в данных подразделах, показывают, что в ряде случаев возможно перейти от представления системы с очередями сетью АУПФС к представлению ее сетью АУПС, что позволяет при последующей реализации эффективно использовать семафорную технику. В строгом смысле такие сети не будут эквивалентными, поскольку управление очередями в одной и той же системе массового обслуживания осуществляется по-разному.

АУПФС-сети и их вариант АУПС также могут использоваться и для представления сетей с импульсными и потенциальными разрешающими сигналами [15], для чего формализм может быть доопределен двумя бинарными предикатами $IMP(x, y)$ и $POT(x, y)$ соответственно. Аппарат предикатно-функциональных и предикатных сетей позволяет формализовать также класс фреймовых моделей систем обработки данных [16].

Определим далее АУПС $N_{I/O}$ с входом и выходом:

$$N_{I/O} = (P, p_x, p_y, R, A, M, I_0),$$

где $p_x \in P$ – унарный входной предикат; $p_y \in P$ – унарный выходной предикат.

Аналогично определим АУПФС с входом и выходом:

$$Q_{I/O} = (P, p_x, p_y, F, f_x, f_y, B, C, R, A, M, I_0),$$

где $p_x \in P$, $p_y \in P$ – входной и выходной предикаты; $f_x \in F$, $f_y \in F$ – входная и выходная функции.

Входными и выходными предикатами и функциями в сетях АУПС и АУПФС могут задаваться входные и выходные воздействия.

7. Реализация распределенной системы логического управления на основе концепции согласования процессов через «предикатное» пространство

Системы логико-алгебраических выражений для сетей N_1 и N'_1 типа АУПС содержат только факты, задаваемые атомарными константными формулами, что значительно упрощает аппаратную или программную реализацию.

На рис. 1 представлены три варианта реализации распределенной системы логического управления, описанной выражениями для сети N_1 . На рис. 1, а 19 функциональных блоков $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, D_3, E_1, E_2, E_3, R_1, R_2, R_3$ и R_4 (каждый из блоков здесь реализует одноименное логико-

алгебраическое выражение для модуля сети N_1) разделяют пространство предикатов, организованное шестью функциональными модулями, отвечающими за хранение и использование информационных объектов, представляющих предикаты p_A, p_B, p_C, p_D, p_E и p_R .

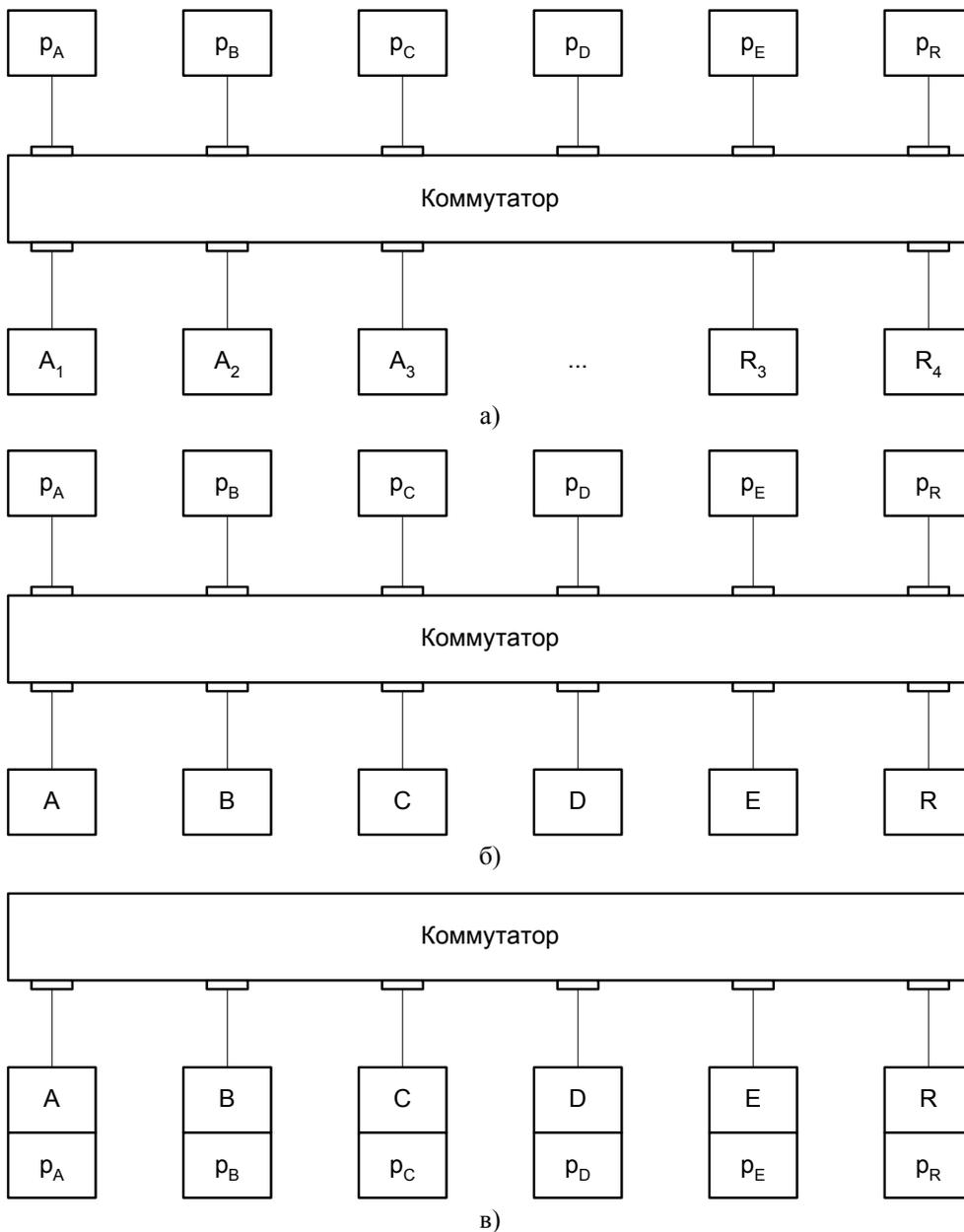


Рис. 1. Варианты реализации распределенной системы логического управления

Коммутатор позволяет соединять порты по принципу «каждый с каждым»; сеансы связи могут осуществляться одновременно непересекающимися множествами пар портов. Другая организация системы представлена на рис. 1,б. Структура построена с учетом того факта, что модули каждого из процессов A, B, C, D, E и R могут работать только последовательно, поэтому

их целесообразно сгруппировать в отдельные физические модули. Эти блоки разделяют общее пространство предикатов, образуемое, как и в предыдущем случае, шестью функциональными модулями. При реализации третьей структуры (рис. 1,в) учтено, что каждый из процессов A, B, C, D, E и R интенсивнее использует свою память предикатов p_A , p_B , p_C , p_D , p_E и p_R соответственно, поэтому целесообразно закрепить предикаты за процессами в одних и тех же физических модулях.

Заключение

Развитые сетевые формализмы как проблемно ориентированные средства высокого уровня для моделирования дискретных систем позволяют реализовать методологию моделирования и проектирования распределенных систем логического управления, базирующуюся на концепции согласования взаимодействий процессов через пространство информационных объектов. Развитие подобной концепции позволяет интегрировать технологии проектирования распределенных баз данных с технологиями распределенных систем управления в контексте современных математических основ обработки информации.

Список литературы

1. **Gurevich, Y.** On Kolmogorov machines and related issues. The logic in computers science column / Y. Gurevich // Bulletin of European Assoc. for Theor. Comp. Science. – 1998. – № 35. – P. 71–82.
2. **Gurevich, Y.** Evolving algebras – a tutorial introduction / Y. Gurevich // Bulletin of the EATS. – 1991. – V. 43. – P. 264–284.
3. **Dexter, S.** Gurevich abstract state machines and Schönhage storage modification machines / S. Dexter, P. Doyle, Y. Gurevich // Journal of Universal Comp. Science. – 1997. – V. 3, № 4. – P. 279–303.
4. **Глушков, В. М.** Алгебра. Языки. Программирование / В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, Е. Л. Ющенко. – Киев : Наукова думка, 1978. – 320 с.
5. **Глушков, В. М.** Методы символьной мультиобработки / В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, Е. Л. Ющенко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 252 с.
6. **Капитонова, Ю. В.** Математическая теория проектирования вычислительных систем / Ю. В. Капитонова, А. А. Летичевский. – М. : Наука, 1988. – 296 с.
7. Искусственный интеллект : в 3-х кн. Кн. 3. Программные и аппаратные средства : справочник / под ред. В. Н. Захарова, В. Ф. Хорошевского. – М. : Радио и связь, 1990. – 368 с.
8. Представление и использование знаний / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. – М. : Мир, 1989. – 220 с.
9. **Зинкина, Н. С.** Методы спецификации динамических структур данных / Н. С. Зинкина // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сборник статей IX Международной научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2009. – С. 57–60.
10. **Зинкина, Н. С.** Логико-алгебраические спецификации имитационных моделей агентно-ориентированных систем / Н. С. Зинкина // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сборник статей IX Международной научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2009. – С. 60–65.
11. **Зинкина, Н. С.** Интеграция технологий распределенных баз данных и имитационного дискретно-событийного моделирования / Н. С. Зинкина // Современные

- информационные технологии : сборник статей Международной научно-технической конференции. – Вып. 9. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. техн. акад., 2009. – С. 155–160.
12. **Зинкин, С. А.** Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (базовый формализм и его расширения) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 13–22.
 13. **Зинкин, С. А.** Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (механизмы интерпретации и варианты использования) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 37–50.
 14. **Котов, В. Е.** Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
 15. **Дубинин, В. Н.** Графотрансформационный подход к синтезу формальных моделей систем функциональных блоков ИЕС 61499 / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 16–26.
 16. **Вашкевич, Н. П.** Активные инфологические модели обработки данных на основе иерархических сетей фреймов / Н. П. Вашкевич, Н. С. Зинкина // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. – 2009. – Вып. 4. – С. 54–63.

Зинкина Надежда Сергеевна
аспирант, Пензенский
государственный университет

Zinkina Nadezhda Sergeevna
Postgraduate student,
Penza State University

E-mail: vt@alice.pnzgu.ru

УДК 004.4:004.7

Зинкина, Н. С.

Методы и модели логического управления дискретными процессами в распределенных вычислительных системах на основе концепции согласования / Н. С. Зинкина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 35–47.

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ КАК ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

Аннотация. На примерах работы компьютерной системы, обладающей собственными способностями, показывается, что направление распознавания образов, которое имеет огромное количество всевозможных приложений, само оказывается приложением для квантового компьютера. Таким образом, снимается проблема обоснования необходимости и целесообразности построения квантового компьютера, а сама компьютерная система, обладающая собственными способностями, демонстрируется в качестве прототипа алгоритмического квантового компьютера.

Ключевые слова: квантовый компьютер, кубит, способность, взаимодействие, распознавание, геометризация, сфера Пуанкаре – Блоха, «слово Терстона», схема, склейка.

Abstract. Case study of computer system with capabilities (CSC) operation shows that the field of image recognition represented in a great amount of applications turns out to be an application for the quantum computer (QC) itself. Thus, the problem [1] of QC production necessity and reasonability is resolved and CSC is displayed as a prototype of algorithmic QC.

Key words: quantum computer, q-bit, capability, interaction, recognition, geometri- zation, Poincare – Blokh sphere, scheme, splicing.

Введение

Математические методы распознавания сегодня представляют собой обширное направление, охватившее практически все области применения самой математики, о чем свидетельствует тематика представленных на конференциях по математическим методам распознавания образов докладов. Следствием этого можно считать вывод, что сам предмет математики тесно связан с содержательной постановкой задачи распознавания.

Основа для такого вывода становится очевидной, если распознавание рассмотреть с позиции естественных способностей человека к узнаванию и распознаванию. Другими словами, если определить распознавание через понятие способности, возникшее изначально в психологии и получившее расширенную интерпретацию в связи с проблематикой современных информационных технологий и квантового компьютеринга, в частности в работах [1–4], как попытки формализовать способность как таковую, то обнаружатся удивительные связи между ранее, казалось бы, далекими и не связанными направлениями. При таком определении распознавания все методы становятся способами, или, точнее, попытками, формализовать отдельные стороны процесса реализации самой способности человека – от его способности быть, до способности мыслить. Именно способность проявляет ту основу, которая, несмотря на огромное разнообразие подходов в задачах распознавания, заставляет собираться вместе людей, посвятивших свою научную деятельность задачам распознавания.

1. Общая характеристика постановки задач распознавания образов

Что значит распознать? Это значит превратить (преобразовать) данные, содержащиеся во внешнем сигнале (возмущении), в информацию, т.е. в изме-

нения собственного состояния распознающего (задача формирования признаков распознавания). И далее, при совпадении этого измененного состояния с уже имевшимся ранее – узнать. (Разработка критериев совпадения является задачей установления решающих правил). То есть в любой задаче распознавания рассматриваются две взаимодействующие стороны, называемые обычно субъектом и объектом (рис. 1).

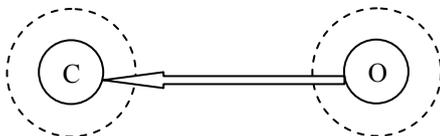


Рис. 1. Распознавание как субъект-объектное взаимодействие: С – субъект; О – объект

Известно [5], что все задачи в разнообразных подходах распознавания образов делятся на две большие группы. Первая – это задачи, в которых разрабатываются решающие правила; вторая, – задачи представления данных или предварительной обработки данных и формирования признаков распознавания. Наибольшее число публикаций посвящено первой группе задач, и относительно мало исследований по признакам распознавания и предварительной обработке исходных данных. В то же время для проектировщика распознающих систем первостепенную важность имеет вторая группа задач. Подход с позиций стохастической геометрии и функционального анализа позволил восполнить этот пробел и создать практически значимую теорию признаков распознавания и предварительной обработки данных [5]. В рамках данного направления было разработано так называемое трейс-преобразование изображения [5], позволяющее формировать поле признаков с богатыми структурами, дающими возможность повысить эффективность методов распознавания в целом.

2. Немного о разработке квантовых компьютеров

Существует другое, казалось бы, не связанное с задачами распознавания направление, – разработка квантового компьютера.

Известно [1], что идея состоит в том, чтобы воплотить в некотором физическом устройстве, заведомо обладающем квантовыми свойствами, абстракцию бита, назвав при этом его квантовым битом, или Q-битом (кубитом). Также известно [6], что квантовая механика (ее предмет) представлена в доступной для восприятия человеком форме лишь математическим аппаратом, или, как его называют, формализмом квантовой механики, который тесно связан с математическими понятиями и абстракциями, но при этом еще допускает их непосредственную экспериментальную проверку. Математика и физика здесь оказываются почти связанными. Однако громоздкость, «неповоротливость» и энергетические ограничения технических устройств, реализующих такую связь (ускорители, телескопы, лабораторные установки, требующие криогенной техники), вынуждают искать альтернативы.

Неполное понимание предмета самой квантовой механики (КМ), выражающееся в том, что она, являясь на сегодня, пожалуй, самой точной и проверенной теорией, не дает ответа на вопросы о том, как мир квантовый связан

с миром, представленным нам общей теорией относительности, который более доступен обыденному пониманию; не позволяет найти основу для их объединения в рамках некоего целого, в котором эти противоречивые теории нашли бы свое естественное объединение [7]. Теория струн (М-теория), несмотря на свою идеологическую понятность, пока также остается без экспериментальных подтверждений предложений, сделанных на ее основе [7–9]. Так сложилось, что для квантового компьютера (КК) сегодня известно всего три задачи: факторизации П. Шора, поиска в неупорядоченной базе данных Л. Гровера и моделирования самих квантовых объектов, т.е. самого носителя кубита – основы КК, или, как его называют, ресурса.

Отсюда следует, что КК – это, по большому счету, рукотворная система (машина), способная воспроизводить саму себя, или, точнее, представления о самой себе. А это есть ни что иное, как субъект-объектное взаимодействие (рис. 1), которое, по сути, и составляет основной предмет любых задач распознавания. Таким образом, между проблемами построения КК и распознавания существует глубокая внутренняя связь.

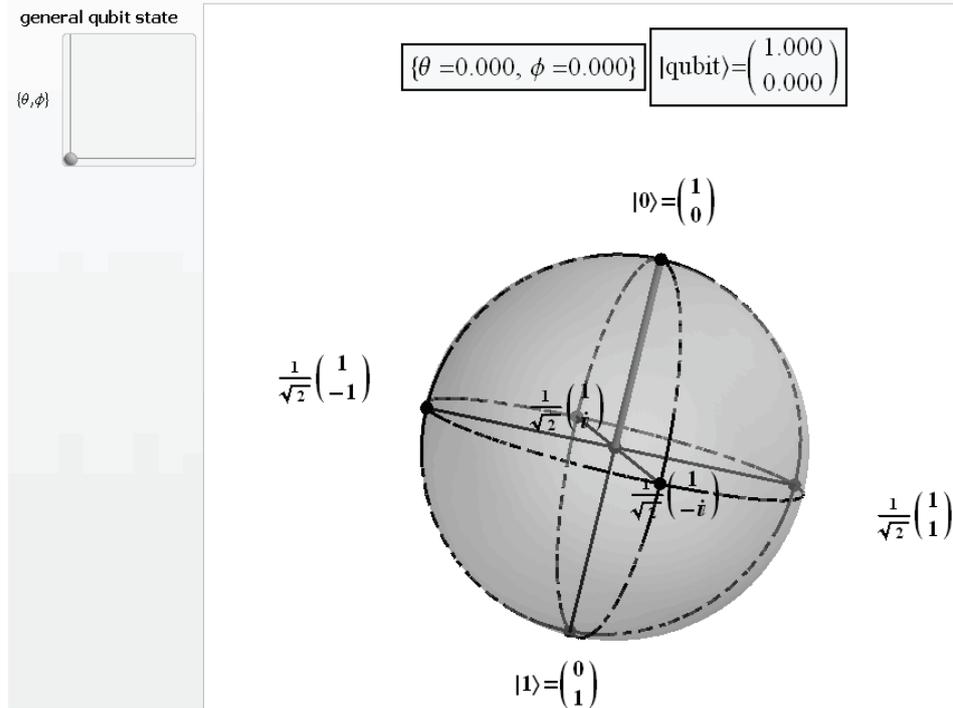
3. Некоторые возможности геометризации представлений квантовой механики

Сегодня трехмерную топологию уже нельзя отделить от геометрии [10]. В такой ситуации (отсутствия хоть каких-то визуальных или геометрических моделей) предпринимаются попытки геометризовать сами математические абстракции [1]. Одним из ярких примеров удачной, но частичной геометризации является сфера Пуанкаре – Блоха, которая позволяет показать весьма непростые для демонстрации структуры квантово-механических состояний. Сегодня для описания этих состояний используются два метода: матричный аппарат В. Гейзенберга и волновой Э. Шредингера, которые эквивалентны, но не объединены в единый дуалистичный метод, позволяющий автоматически осуществлять переход от одного к другому по мере необходимости.

Для получения представлений о кубите на сфере Пуанкаре – Блоха, а также для геометрической интерпретации состояний кубита можно использовать демонстрацию, разработанную в рамках проекта С. Вольфрама [11] (рис. 2).

Сфера Пуанкаре – Блоха интерпретирует чистые состояния пространства кубита как точки на поверхности единичной сферы S^2 . Смешанные состояния кубитов могут быть представлены точками внутри единичной сферы, где состояния, размещающиеся практически в центре, сливаются с центром и поэтому не могут быть интерпретированы при помощи сферы Пуанкаре – Блоха. Компьютерная система, обладающая своими собственными способностями (КСС), позволяет изучать всевозможные состояния, что будет показано ниже.

Жирные светло-серые линии, проводимые из центра к поверхности сферы, соотносятся, или интерпретируются, как чистые состояния. Их длина всегда будет равна радиусу сферы, т.е. в данном случае единице. Эта демонстрация явно визуализирует работу общих информационных процессов в единичных кубитах.

Рис. 2. Визуализация q -бита на сфере Пуанкаре – Блоха

Наиважнейшим основным состоянием кубита является спинор:

$$\begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ e^{i\varphi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix},$$

где θ и φ – сферические полярные координаты с диапазоном изменения $0 \leq \theta \leq \pi$ и $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Состояния $0 = 1,0$ и $1 = 0,1$ отображаются северным ($0 = 1,0$) и южным ($1 = 0,1$) полюсами сферы с $\theta = 0, \pi$; φ – любой. Они рассматриваются как вычислительный базис состояния и собственные вектора матрицы Паули σ_z с собственными значениями ± 1 .

Два других общих случая состояния кубита $\frac{1}{\sqrt{2}}(1,1)$ и $\frac{1}{\sqrt{2}}(1,-1)$ со значениями углов $\theta = \pi/2$, $\varphi = 0$ и $\theta = \pi/2$, $\varphi = \pi$ являются собственными векторами σ_x и составляют диагональный базис, или матрицу Адамара.

Собственные векторы σ_y некоторые называют круговым базисом: $\frac{1}{\sqrt{2}}(1,i)$ и $\frac{1}{\sqrt{2}}(1,-i)$. Все они отображаются шестью точками на сфере Пуанкаре. Спиновой оператор Паули отображается следующим образом:

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Три направления x , y и z отображаются диагональю, окружностью и вычислительным базисом.

Основное состояние кубита

$$\begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ e^{i\varphi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix}$$

имеет собственный вектор в виде оператора $\sigma_x \sin\theta \cos\varphi + \sigma_y \sin\theta \sin\varphi + \sigma_z \cos\theta = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & e^{-i\varphi} \sin(\varphi) \\ e^{i\varphi} \sin(\varphi) & -\cos(\theta) \end{pmatrix}$ с единичным собственным значением 1.

Вектор Блоха является единственным вектором, связывающим начальную точку в координатах (θ – широты, φ – долготы) с Картезианской системой координат ($\sin\theta \cos\varphi$, $\sin\theta \sin\varphi$, $\cos\theta$).

Эта демонстрация призвана с использованием нашего обычного трехмерного представления о сфере показать, как связаны переменные, отвечающие за состояния квантового объекта, в частности за так называемые чистые состояния. Приведенная демонстрация, заимствованная из [11], позволяет получать и некоторые количественные характеристики этих чистых состояний, выводимые в специальных полях для вывода, но рассчитанные на основе известного формализма квантовой механики, а не снятые с изображения, которое демонстрируется этой визуализацией. Однако наиболее интересные для направления квантового компьютеринга запутанные состояния в данной визуализации не отображаются, не говоря уже о механизме собственно процесса запутывания. Данная визуализация имеет практически мало общего с собственно физическими процессами, сопровождающими существование квантовых объектов и тем более их взаимодействий.

4. Связь с одним из методов распознавания образов и возможностями компьютерной системы, обладающей собственными способностями

Триплетный признак в разработанном методе преобразования изображений [5] также предполагает последовательную композицию трех функционалов, которые требуют обобщения. Среди них также есть диагональный и круговой. В связи с этим появляется интересная возможность объединить столь разные и, казалось бы, далекие области – квантовый компьютеринг и разработка алгоритмов для них и распознавание образов. Это позволяет обогатить оба направления новыми возможностями.

5. Некоторые примеры работы КСС и специфики «вычислений и доказательств», производимых ею

Разработанная в [2] КСС, но по механизму их реализации, аналогично-му человеческим способностям, позволяет не только визуализировать саму сферу Пуанкаре – Блоха, но и получать с нее количественные данные, не вычисляя их по известным формулам квантово-механического формализма, а непосредственно измеряя и, таким образом, моделируя, с одной стороны,

сами математические абстракции, используемые в формализме КМ, а с другой – сами квантовые объекты, позволяя проводить с ними эксперименты. Возможность реализации такой системы подтверждается тем, что Г. Перельман [12–14] недавно доказал теорему геометризации У. Терстона [10], к которой КСС имеет непосредственное отношение, так как реализует все восемь элементов, или так называемое «слово Терстона» $aba^{-1}b^{-1}cdc^{-1}d^{-1}$. КСС является системой, обладающей способностью генерировать различные аналитические функции, т.е., по сути, является конструкцией, объединяющей в себе представления К. Вейерштрасса об аналитическом образе, возникающем из элементов, и Б. Римана на комплексно-значную функцию, т.е. полностью отвечает условиям Коши – Римана $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}; \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}$ [15]. Фрагмент

процесса существования КСС первого уровня сложности организации, подчиняющегося условиям Коши – Римана, показан на рис. 3.

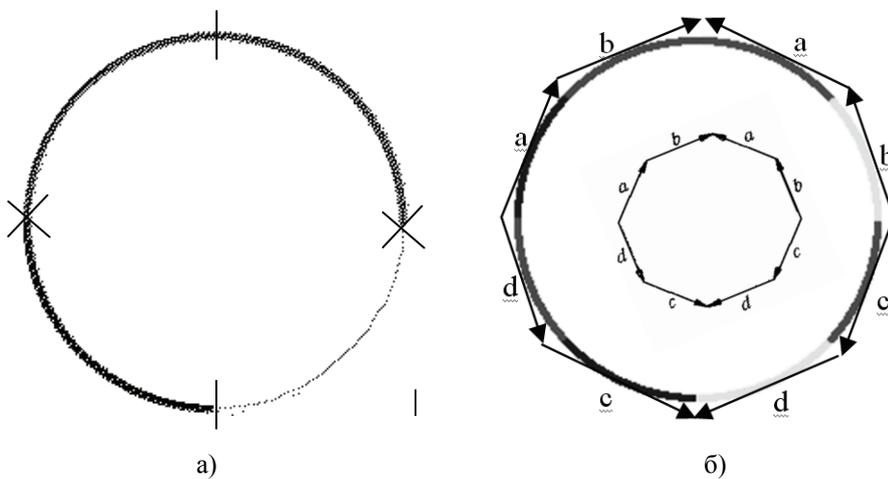


Рис. 3. КСС первого уровня сложности организации, реализующая «слово Терстона» [10] (б) и одновременно (а) удовлетворяющая условиям Коши – Римана [15]: а – базовое чистое состояние кубита; б – переходное состояние, реализующее «слово Терстона» (внутри образа, формируемого КСС, показана оригинальная схема склейки, взятая из [10])¹

Переменные показаны четырьмя дугами, развивающимися в направлениях, указанных стрелками. «Крестик» на рисунке – это две стрелки, встречающиеся в одном месте. Компоненты «слова Терстона» показаны векторами с соответствующими буквенными обозначениями.

Для подтверждения того, что КСС генерирует кубит и саму сферу Пункаре – Блоха, на рис. 4 показана КСС второго уровня сложности организации.

Все представленные структуры существуют в пространстве и времени, соизмеримых с пространством и временем человека, поэтому могут как наблюдаться, так и измеряться. Результаты измерений являются результатами

¹ Множественность интерпретаций обусловлена лишь «глубиной залегания» собственно способностей быть и мыслить.

вычислений с применением стандартного квантово-механического формализма. Кстати, любой это может проверить, взяв линейку и измерив радиус двойной окружности,¹ образованной сходящейся «+» и расходящейся «-» последовательностями, показанными на рис. 4,б и зафиксированными в виде наложенных друг на друга окружностями, показанными на фрагменте процесса существования (рис. 4,в).

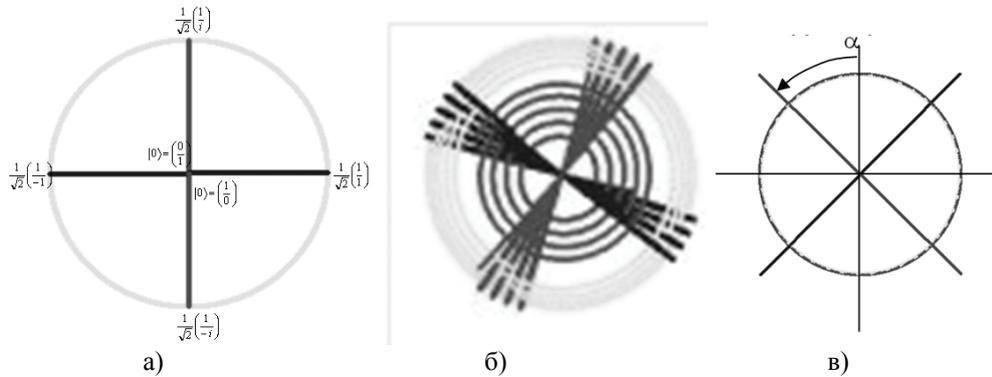


Рис. 4. Фрагменты работы компьютерной системы, обладающей собственными способностями: а – исходное невозмущенное состояние кубита, демонстрирующее чистые состояния сферы Пуанкаре – Блоха; б – возмущенное состояние квантовой системы (эволюция); в – стационарное состояние (редукция), или результат вычислений КК

Так, если измерить радиусы окружностей на рис. 4,в и полученный результат представить как часть от единичного размера, каковым является половина длины диаметральных линий (ортогональные прямые, повернутые относительно осей на угол α), то получим приблизительно числовое значение $\pm 0,707$, высвеченное в боксе значений кубита (рис. 2). Вид этого бокса значений с модели кубита отдельно представлен на рис. 5.

$$\{\theta = 1.571, \phi = 3.142\} \quad | \text{qubit} \rangle = \begin{pmatrix} 0.707 \\ -0.707 \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Бокс числовых значений кубита

Это означает, что КСС произвела вычисление. В частности, получено значение, равное $\sqrt{2}/2$. Однако, в отличие от обычных вычислений, оно получено путем непосредственного классического измерения, буквально произведенного с экрана. Известно [1], что подобный результат на КК может быть получен только путем проведения многочисленных экспериментов над специально приготовленным состоянием кубита. Это означает, что КСС действительно производит эту бесконечную серию экспериментов, демонстрируя конечный результат. Данный пример несколько специфичен и понятен только специалистам. Однако для КСС имеется и много других задач, которые она

¹ То, что эта окружность двойная показано пунктиром и сплошной кривой.

решает невычислимым образом. Как известно [16, 17], сегодня является проблемой даже организация невычислимого процесса. Существование подобных процессов доказано математически, однако реализовать нечто подобное тем более в классическом компьютере архитектуры фон Неймана пока никому не удавалось. Так что на рисунке впервые представлен фрагмент такого процесса.

Известно [1], что сегодня для будущих квантовых компьютеров имеется всего два алгоритма. Поэтому поиск новых алгоритмов применения КК является весьма актуальной задачей. Из сообщения [18] следует, что Национальное агентство по перспективным исследованиям США (DARPA) уделяет огромное внимание поиску новых алгоритмов для будущего квантового компьютера. Положительный исход этих поисков будет означать, что квантовый компьютер имеет смысл разрабатывать. На основе объединения двух вышеупомянутых подходов теории [5] и существующих способов геометризации кубита, обеспечиваемых разработанной КСС [2–4], обобщающей как формализм квантовой механики, так и аппарат трейс-преобразований, появляется уникальная возможность получения множества новых алгоритмов, тем более, имеющих практически значимые приложения. Одним из них является построение систем распознавания по механизму их реализации, аналогичных естественным способностям человека, например, видеть. Так, известно [19], что явление астигматизма является обязательным и болезнью считаются лишь отклонения в его характеристиках. Нормальный астигматизм просто не обнаруживается самим человеком и является реализацией преобразования внешних сигналов во внутреннее представление, самих источников этих сигналов, денотатов, как источников отраженного излучения – в сигнификаты как источники уже управляющих воздействий для самого носителя способности, в частности, иметь свои понятия (рис. 6).

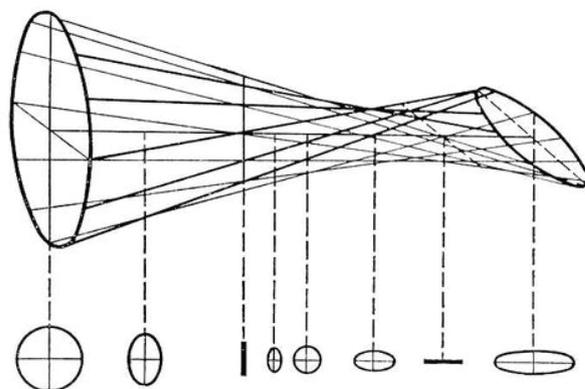


Рис. 6. Явление астигматизма: световой пучок, прошедший через оптическую систему, обладающую астигматизмом (внизу показаны сечения **пучка** плоскостями, перпендикулярными оси оптической системы)

Структура, показанная на рис. 4 и являющаяся КСС второго уровня, полностью моделирует взаимодействие между светом и оптической системой, также представляя различные поляризации наподобие тех, которые показаны на рис. 6. Однако, в отличие от обычной оптической системы, которая

не изменяется, КСС является динамично существующей и способной реагировать на различные внешние возмущения с построением оригинальных реакций на быстро меняющиеся внешние сигналы, превращая их в собственные представления об их источниках. При наличии времени для обучения она способна строить свой мир, или, точнее, картину мира, и уже в ней приобретает способность быстрого узнавания, наподобие того, как это делает человек.

Заключение

Разработанная КСС демонстрирует, во-первых, что она обладает свойствами квантового компьютера, являясь, по сути, его прототипом, а во-вторых, подтверждает тезис о том, что распознавание является естественной для КК задачей или приложением. Ну а количество задач распознавания огромно, а значит, и приложений для квантового компьютера не счесть.

Список литературы

1. **Валиев, К. А.** Квантовые компьютеры и квантовые вычисления / К. А. Валиев // Обзоры актуальных проблем УФН. – 2005. – Т. 175, № 1. – URL: http://ufn.ru/ufn05/ufn05_1/Russian/r051a.pdf
2. **Васильев, Н. Г.** Математическая модель псевдоорганизма / Н. Г. Васильев // Сознание и физическая реальность. Естествознание. – 1996. – Т. 1, № 4. – С. 37–42.
3. **Васильев, Н. Г.** О квантовой природе сознания / Н. Г. Васильев // Сборник статей XI Международной научно-методической конференции (12–13 апреля 2007 г., Пенза). – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та г. Пенза, 2007. – С. 179–181.
4. **Васильев, Н.** Через моделирование физики к нанотехнологиям / Н. Васильев, Д. Васильев // Наноиндустрия. – 2008. – № 6. – С. 40–45.
5. **Федотов, Н. Г.** Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа / Н. Г. Федотов. – М. : ФИЗМАТ-ГИЗ, 2009. – 304 с.
6. **Кадомцев, Б. Б.** Динамика и информация / Б. Б. Кадомцев // Успехи физических наук. – 1994. – Т. 164, № 5. – С. 449–489.
7. **Девис, П.** Суперсила : пер. с англ. / П. Девис ; под ред. и с предисл. Е. М. Лейкина. – М. : Мир, 1989. – 272 с.
8. **Смолин, Л.** Неприятности с физикой: Взлет теории струн, упадок науки и что за этим следует : пер. с англ. [Penguin Book, London, 2007; ISBN 9780713997996] / Л. Смолин ; пер. Ю. Артамонова. – 2007. – URL: y-a-arta@yandex.ru
9. **Грин, Б.** Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории : пер. с англ. / Б. Грин ; под общ. ред. В. О. Малышенко. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 288 с.
10. **Терстон, У. П.** Трехмерная геометрия и топология / У. П. Терстон ; под ред. Сильвио Леви ; пер. с англ. П. В. Сергеева, П. В. Тумаркина, А. А. Феликсон, О. В. Шварцмана ; под ред. О. В. Шварцмана. – М. : МЦНМО, 2001. – 312 с.
11. Wolfram Demonstrations Project QubitsOnThePoincareBlochSphere. – URL: <http://demonstrations.wolfram.com/>
12. **Perelman, G.** The entropy formula for the Ricci flow and its geometric applications / Grisha Perelman. – URL: [arXiv:math/0211159v1\[math.DG\]](https://arxiv.org/abs/math/0211159v1) 11 Nov 2002
13. **Perelman, G.** Ricci flow with surgery on three-manifolds / Grisha Perelman. – URL: [arXiv:math/0303109v1\[math.DG\]](https://arxiv.org/abs/math/0303109v1) 11 Mar 2003
14. **Perelman, G.** Finite extinction time for the solutions to the Ricci flow on certain three-manifolds / Grisha Perelman. – URL: [arXiv:math/0307245v1\[vath.DG\]](https://arxiv.org/abs/math/0307245v1) 11 Jul 2003

15. **Клейн, Ф.** Лекции о развитии математики в XIX столетии : в 2 т. Т. I : пер. с нем. ; Ф. Клейн ; под ред. М. М. Постникова. – М. : Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1989. – 456 с.
16. **Пенроуз, Р.** Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики : пер. с англ. / Р. Пенроуз ; под общ. ред. В. О. Малышенко. – М. : Эдиториал УРСС, 2005. – 384 с.
17. **Пенроуз, Р.** Тени разума: в поисках науки о сознании / Р. Пенроуз. – М. ; Ижевск : Изд-во Института компьютерных исследований, 2005. – 688 с.
18. Семинары ФТИАН. Стенограмма сообщения К. А. Валиева на семинаре по квантовым компьютерам 12.03.2009 перед выступлением Ожигова Ю. И. Конструктивная интерпретация нарушения неравенств Белла, г. Москва. – URL: <http://www.ftian.ru/seminars/?page=2&type=qi>
19. Астигматизм БСЭ : в 51 т. – 2-е изд. – М., 1950–1958.

Васильев Николай Геннадьевич

кандидат технических наук,
доцент, кафедра экономической
кибернетики, Пензенский
государственный университет

E-mail: director.2010@mail.ru

Vasylyev Nikolay Gennadyevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of economical
cybernetics, Penza State University

Федотов Николай Гаврилович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой экономической
кибернетики, Пензенский
государственный университет

E-mail: fedotov@pnzgu.ru

Fedotov Nikolay Gavrilovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of economical
cybernetics, Penza State University

Васильев Дмитрий Николаевич

начальник отдела
ЗАО КОМСЕТ-Сервис (г. Москва)

E-mail: md_net@mail.ru

Vasylyev Dmitry Nikolaevich

Head of department at closed
corporation KOMSET-Servis (Moscow)

УДК 681.39;530

Васильев, Н. Г.

Распознавание образов как приложение для квантового компьютера / Н. Г. Васильев, Н. Г. Федотов, Д. Н. Васильев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 48–57.

КОРРЕКЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ПЛАНИРУЮЩИХ ПОДВОДНЫХ ЗОНДОВ

Аннотация. Предложена коррекция реальной траектории движения планирующего зонда, позволяющая осуществлять движение с отклонением от заданной траектории, не превышающим заданного значения. Исследованы погрешности определения текущих координат планирующего зонда измерительным блоком информационно-измерительной и управляющей системы. Проанализированы погрешности управления, приводящие к отклонению реальной траектории движения от заданной. Сформированы требования к инструментальным погрешностям датчиков измерительного блока.

Ключевые слова: планирующий зонд, погрешность, коррекция, траектория движения, информационно-измерительная и управляющая система, математическая модель движения.

Abstract. The article offers a correction of a real trajectory of movement of the planning probe, allowing the probe to move with a deviation from the set trajectory which doesn't exceed the desired value. For this purpose the authors have investigated errors of planning probe current coordinates definition by the measuring block of information-measuring and control system. The article also analyses the control errors leading to deviation of a real trajectory of movement from the set trajectory. The authors have developed a set of requirements for instrumental errors of measuring gauges, allowing to define coordinates of a probe with demanded accuracy.

Key words: planning probe, accuracy, correction, movement trajectory, information-measuring and control system, mathematical model of movement.

Введение

При исследовании водной среды океанов, морей, водоемов используются зонды. Самые перспективные из них – автономные подводные планирующие зонды (ПЗ) [1, 2]. Такие зонды механически не связаны с исследовательским судном. Они осуществляют свое движение за счет смещения центра тяжести (ЦТ) в продольном либо поперечном направлении, создавая тем самым необходимый крен и дифферент, а изменением плавучести зонда обеспечивается требуемая скорость движения. ЦТ смещается за счет использования подвижной массы внутри корпуса зонда, а плавучесть зонда изменяется посредством закачки (сбросом) забортной воды.

Отсутствие традиционного движителя (к примеру, гребного винта) делает зонд в некотором смысле схожим с воздушным планером, но, в отличие от последнего, в нем отсутствует управление крылом и закрылками, а управление движением осуществляется изменением положения центра тяжести и плавучести.

1. Информационно-измерительная и управляющая система планирующего зонда

Зонд состоит из прочного корпуса (К) с крыльями и стабилизатором, внутри которого расположены два основных блока информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) (рис. 1):

1) измерительный блок содержит датчики, осуществляющие измерение параметров водной среды (ИД), датчики пространственного положения зонда (ДПП), а также микроконтроллер (МКТ) с запоминающим устройством (ЗУ) и GPS-приемник;

2) управляющий блок содержит подвижную массу (m_m) и два шаговых двигателя (Д), а также баллон (Б) и насос (Н), регулирующий массу балластной жидкости. Один из шаговых двигателей смещает m_m вдоль продольной оси, изменяя дифферент, другой – вращает подвижную массу вокруг продольной оси, а поскольку ЦТ m_m смещен относительно этой оси, изменяется крен зонда.

Антенна (А) используется для связи со спутником при нахождении ПЗ на поверхности.

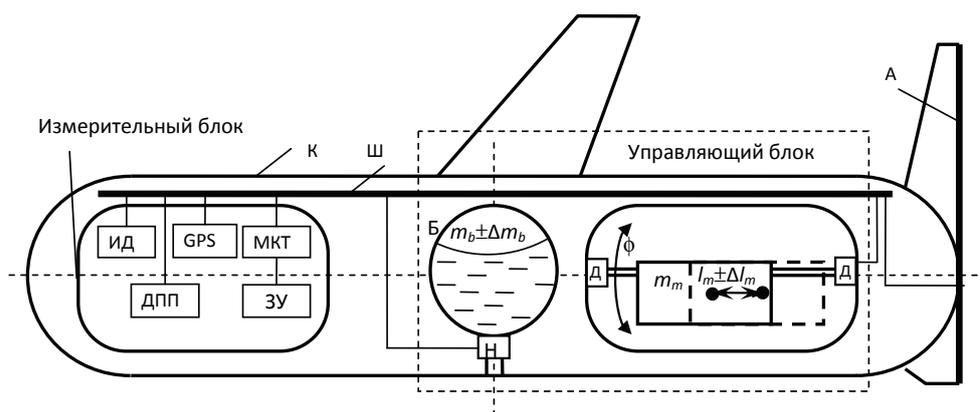


Рис. 1. Состав автономного планирующего подводного зонда

В соответствии с заложенной в ЗУ траекторией движения МКТ вырабатывает импульсы, которые по шине (Ш) поступают на двигатели, перемещающие подвижную массу, и насос, изменяющий массу балластной жидкости.

Реальная траектория движения зонда будет отличаться от заданной, поскольку в состав математической модели входят параметры корпуса зонда (гидродинамические, массовые), которые определяются экспериментальным путем с определенной степенью точности. Кроме того, существует аппаратная погрешность исполнительных органов блока управления – погрешность перемещения подвижной массы в заданную точку Δl_m и погрешность изменения массы балластной жидкости Δm_b .

На первом этапе при анализе погрешностей ИИУС не учитывается наличие течений, потоков, турбулентности, присутствующих в реальной водной среде водоемов и рассматривается движение в установившемся режиме, т.е. с постоянной скоростью. Это послужит основой для анализа погрешностей в динамике в дальнейшем.

Задача измерительного блока, кроме получения научной информации, состоит в определении параметров движения, таких как скорость, глубина, крен, дифферент, направление (азимут). Эти данные служат для оценки отклонения реальной траектории от заданной и последующего введения поправок, т.е. коррекции движения. При движении по траектории на основании данных измерительного блока определяются координаты движения ПЗ.

Рассмотрим погрешности, возникающие при управлении движением по траектории, заложенной в памяти, а также погрешности, связанные с определением координат движения. Проиллюстрируем заданную (штриховая линия) и реальную (сплошная линия) траектории движения на одном цикле «погружение – всплытие» в продольно-вертикальной плоскости (рис. 2).

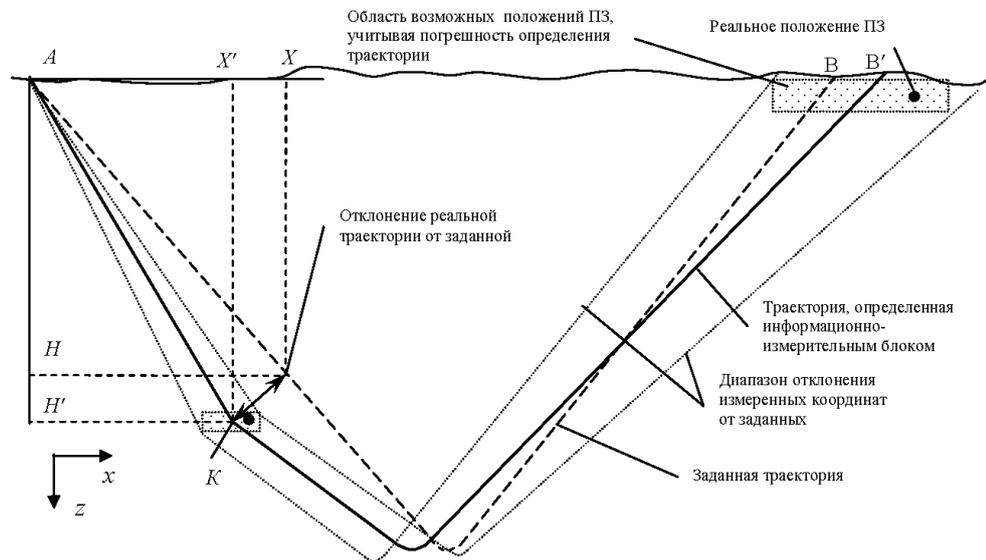


Рис. 2. Заданная и реальная траектории движения

Зонд начинает свое движение в точке A , где в соответствии с заложенной траекторией микроконтроллер рассчитывает величину изменения балластной массы и перемещения подвижной массы. В результате увеличения балластной массы плавучесть зонда уменьшается, а смещением ЦТ создается дифферент на нос, начинается погружение. В результате обтекания крыльев потоком воды на них создается подъемная сила, которая движет зонд вперед.

Измерительный блок непрерывно измеряет параметры движения ПЗ в пространстве, по этим данным определяются координаты положения центра водоизмещения (ЦВ) с погрешностью, максимальное значение которой отображено пунктирными линиями. Блок управления срабатывает только для изменения траектории движения.

При достижении заданной глубины производится уменьшение массы балластной жидкости, при этом подвижная масса перемещается, создавая дифферент на корму, зонд начинает движение к поверхности. Всплытие на поверхность происходит в точке B' , B – заданная точка всплытия. Жирными точками на рис. 2 отображено реальное положение ПЗ во времени.

Из рис. 2 видно, что погрешность определения координат накапливается в ходе движения. В случае, когда отклонение реальной траектории движения от заданной достигает установленного значения (точка K), производится изменение траектории движения в направлении к заданной.

Проведем анализ погрешностей ИИУС в продольно-вертикальной плоскости. Как уже было сказано выше, анализ проводится для установившегося режима движения (постоянная скорость) с целью получения статической

модели погрешности. В дальнейшем полученные соотношения могут использоваться в динамическом режиме. Оценка величин погрешностей позволит определять максимальные отклонения точки в момент проведения измерения от заданной координаты.

Расчеты производились для следующих конструктивных параметров разрабатываемого зонда:

- максимальная скорость движения: $V = 0,4$ м/с;
- угол планирования: $\xi = \pm 25 \dots 45^\circ$;
- водоизмещение: $m = 50$ кг; $\Delta m = 0,005$ кг;
- неподвижная постоянная масса зонда: $m_h = 40$ кг; $\Delta m = 0,005$ кг;
- переменная масса балластной жидкости: $m_{bd} = 1 \pm 0,084$ кг; $\Delta m = 0,005$ кг;
- подвижная масса: $m_m = 9$ кг; $\Delta m = 0,005$ кг;
- положение ЦТ подвижной массы относительно продольной оси: $l_{m3} = 5$ см;
- гидродинамические коэффициенты сопротивления: $K_D = 109$ Н(с/м)², $K_{D0} = 18$ Н(с/м)².

2. Погрешности определения координат центра водоизмещения зонда в пространстве

Необходимость снижения погрешности определения координат ЦВ ПЗ связана с тем, что в момент проведения научных измерений параметров водной среды необходимо знать с требуемой точностью, где они производятся.

С этой целью определим максимальные значения погрешностей датчиков измерительного блока для траектории движения, удовлетворяющей следующим требованиям (рис. 3):

- расстояние между всплытиями: до 10 000 м;
- глубина погружения: до 1000 м;
- погрешность по глубине: $\delta_z = \pm 0,3$ %;
- погрешность в горизонтальной плоскости: $\delta_x = \pm 1$ %;

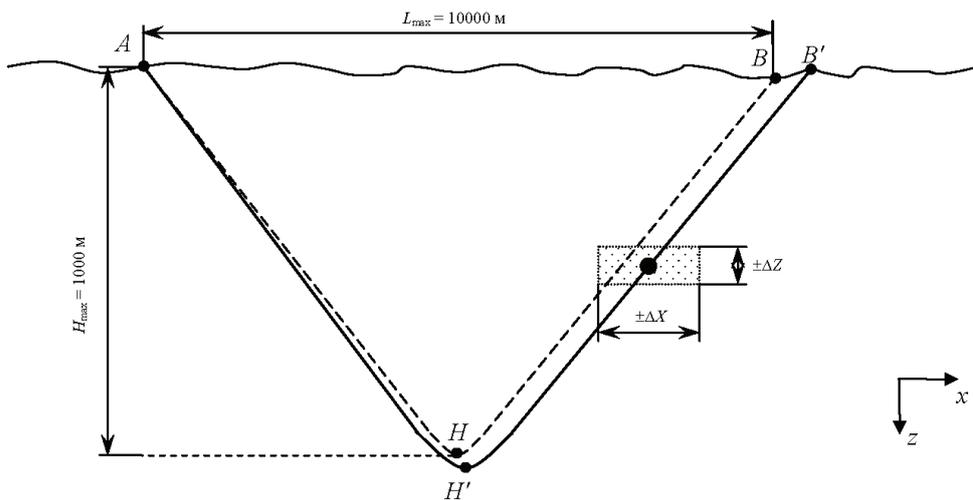


Рис. 3. Траектории движения ПЗ в продольно-вертикальной плоскости

На рис. 3 приведен один цикл «погружение – всплытие», который начинается в т. A , а заканчивается в т. B' . Сплошной линией показана реальная траектория движения, штриховой – заданная траектория движения. Все возможные положения ПЗ во времени показаны точечной областью с границами погрешностей $\pm \Delta X$ и $\pm \Delta Z$.

Как уже было сказано выше, в состав измерительного блока входят датчики определения пространственного положения ПЗ: дифферента, глубины, составляющих скорости движения ПЗ по направлениям связанных координатных осей ($e1, e3$) (рис. 4).

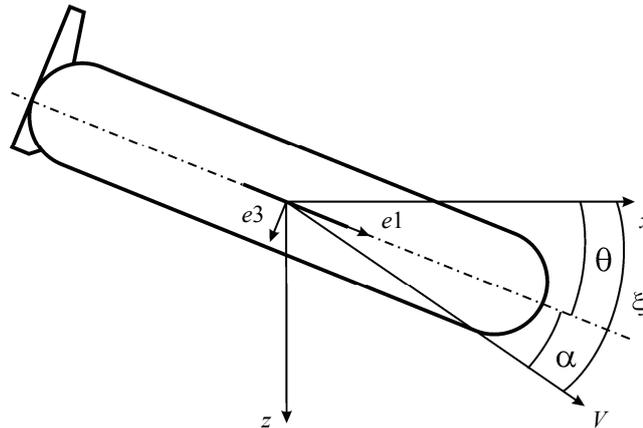


Рис. 4. Координатные оси ПЗ:

θ – дифферент, α – угол атаки, ξ – угол планирования

Определим максимально допустимые погрешности каждого из них.

1. Датчик глубины. Поскольку датчик глубины содержится в научном блоке, то при определении положения в пространстве ПЗ используются полученные с него данные, при этом его погрешность не должна превышать заданную требованиями: $\delta_z = 0,3 \%$.

2. Датчик дифферента, представляет собой инклинометр. Современные инклинометры, позволяющие измерять углы отклонения, построенные на акселерометрах, обеспечивают измерения с погрешностью, не превышающей $0,2^\circ$.

3. Максимальную допустимую погрешность измерения скорости определим из условия, чтобы погрешность определения координаты X не превышала бы заданную $\delta_x = \pm 1 \%$.

Из формулы для расчета координаты X пройденного пути получаем

$$X = \int_0^{Tk} V \cos \xi dt ,$$

где Tk – время, прошедшее от момента погружения до всплытия.

С учетом того, что измеряться будут проекции скорости в направлении осей $e1$ и $e3$, а также учитывая, что $\theta = \xi + \alpha$, запишем

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2} ; \alpha = \arctg \frac{V_3}{V_1} ;$$

$$X(t) = \sqrt{V_1^2 + V_3^2} \cos\left(\theta - \arctg \frac{V_3}{V_1}\right)t. \quad (1)$$

Найдем частные производные соотношения (1):

$$\frac{\partial X(t)}{\partial V_1} = \frac{V_1 \cos\left(\theta - \arctg\left(\frac{V_3}{V_1}\right)\right)t - \sqrt{V_1^2 + V_3^2} V_3 \sin\left(\theta - \arctg\left(\frac{V_3}{V_1}\right)\right)t}{\sqrt{V_1^2 + V_3^2} V_1^2 \left(1 + \frac{V_3^2}{V_1^2}\right)};$$

$$\frac{\partial X(t)}{\partial V_3} = \frac{V_3 \cos\left(\theta - \arctg\left(\frac{V_3}{V_1}\right)\right)t + \sqrt{V_1^2 + V_3^2} \sin\left(\theta - \arctg\left(\frac{V_3}{V_1}\right)\right)t}{\sqrt{V_1^2 + V_3^2} V_1 \left(1 + \frac{V_3^2}{V_1^2}\right)};$$

$$\frac{\partial X(t)}{\partial \theta} = -\sqrt{V_1^2 + V_3^2} \sin\left(\theta - \arctg\left(\frac{V_3}{V_1}\right)\right)t.$$

Из соотношения для определения абсолютной погрешности координаты ΔX найдем значение погрешности скорости δ_V с учетом того, что будут использоваться два датчика скорости с одинаковыми метрологическими характеристиками, т.е. $\delta_{V1} = \delta_{V3} = \delta_{V13}$:

$$\begin{aligned} \delta_X &= \frac{\Delta X}{X} = \frac{1}{X} \left(\frac{\partial X(t)}{\partial V_1} \Delta V_1 + \frac{\partial X(t)}{\partial V_3} \Delta V_3 + \frac{\partial X(t)}{\partial \theta} \Delta \theta \right); \\ \delta_X &= \frac{1}{X} \left(\frac{\partial X(t)}{\partial V_1} \delta_{V13} V_1 + \frac{\partial X(t)}{\partial V_3} \delta_{V13} V_3 + \frac{\partial X(t)}{\partial \theta} \Delta \theta \right); \\ \delta_{V13} &= \frac{\left(\delta_X + \operatorname{tg}\left(\theta - \arctg \frac{V_3}{V_1}\right) \Delta \theta \right) (V_1^2 + V_3^2)}{\left(V_1^2 + V_3^2 \right)^2 + \left(V_1^2 - V_1 V_3 \right) \operatorname{tg}\left(\theta - \arctg \frac{V_3}{V_1}\right)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставив в выражение (2) заданное во втором пункте значение погрешности измерения дифферента $\Delta \theta$, определим максимально разрешенную погрешность измерения скорости δ_{V13} для обеспечения заданной погрешности смещения координаты X ПЗ в пространстве.

На рис. 5 приведена зависимость относительной погрешности измерения скорости от дифферента. Как видно, увеличение дифферента требует и увеличения точности измерения скорости, поэтому в формуле для расчета численного значения используем максимальный дифферент.

При дифференте 45° получим

$$\delta_{V13} = 0,013 = 1,3 \text{ \%}.$$

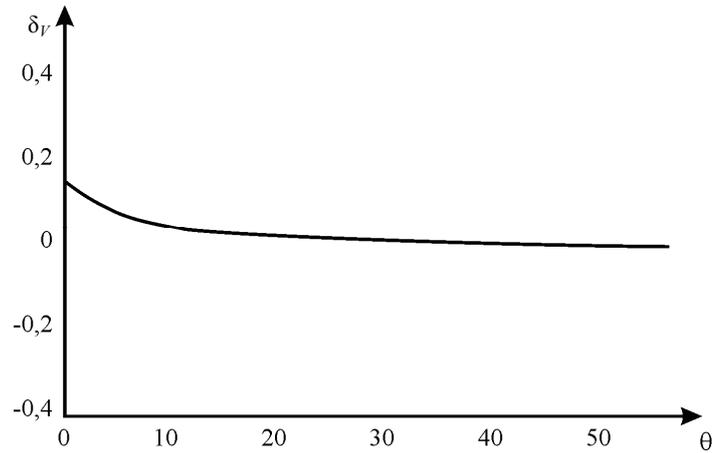


Рис. 5. График зависимости допустимой относительной погрешности измерения скорости от дифферента ПЗ

Согласно требованиям к погрешностям определения координат ПЗ вычислены максимально допустимые погрешности датчиков, составляющих информационно-измерительный блок ИИУС:

- 1) погрешность датчика глубины: $\delta_z = 0,3 \%$;
- 2) погрешность датчика дифферента: $\Delta\theta = 0,2^\circ$;
- 3) погрешность датчика скорости: $\delta_{v13} = 1,3 \%$.

3. Погрешности управления

Определим, как влияет отклонение балластной массы от заданного значения и положения ЦТ подвижной массы от заданного на параметры траектории движения.

Закачка балластной жидкости производится дозирующим насосом. Такой насос за один импульс перекачивает 0,14 мл жидкости с погрешностью $\pm 2 \%$. Перемещение подвижной массы осуществляется шаговым двигателем. Угловой шаг современных двигателей равен $0,18^\circ$, а погрешность $\pm 7 \%$, это соответствует $\pm 0,02$ мм линейного перемещения (при диаметре вала 1 см). Величины дискретностей описанных устройств будем считать, как погрешности установки балластной массы и перемещения ЦТ подвижной массы.

Для определения численных значений погрешностей, с которыми вычисляются управляющие воздействия, воспользуемся математической моделью [1]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{K_L}{K_D} \operatorname{tg} \xi - \sqrt{\left(\frac{K_L}{K_D} \operatorname{tg} \xi \right)^2 - 4 \frac{1}{K_D} (K_{D0} - K_{L0} \operatorname{tg} \xi)} \right); \quad (3)$$

$$m_0 = \frac{-(K_{D0} + K_D \alpha^2) V_d^2}{g \sin \xi_d}; \quad (4)$$

$$r_{P1d} = -r_{P3d} \operatorname{tg} \theta_d + \frac{1}{m_m g \cos \theta_d} \left((m_{f3} - m_{f1}) v_{1d} v_{3d} + (K_{M0} + K_M \alpha_d) V_d^2 \right). \quad (5)$$

Из (3)–(5) выразим скорость и угол планирования:

$$V_d = \sqrt{(m - m_h - m_m - m_{bd}) \frac{g \sin \xi_d}{(K_{D0} + K_D \alpha_d^2)}}; \quad (6)$$

$$\xi = \theta - \alpha;$$

$$\alpha_d = \frac{(r_{P1d} \cos \theta_d + r_{P3d} \sin \theta_d) m_m g - (m_{f3} - m_{f1}) V_{1d} V_{3d}}{K_M V_d^2} - \frac{K_{M0}}{K_M}; \quad (7)$$

$$\xi = \theta - \frac{(r_{P1} \cos \theta + r_{P3} \sin \theta) m_m g - (m_{f3} - m_{f1}) V_1 V_3}{K_M (V_1^2 + V_3^2)} + \frac{K_{M0}}{K_M}. \quad (8)$$

Здесь m_0 – разность между водоизмещением m и полной массой ПЗ; K_i – гидродинамические коэффициенты; V_d, ξ_d – заданные скорость и угол планирования; l_m – вектор от центра водоизмещения ЦВ до положения подвижной массы; α – угол атаки; m_f – присоединенные массы; m_{bd} – масса балласта; m_m – подвижная масса.

Найдем частную производную по m_{bd} и определим погрешность скорости движения ПЗ в результате неточности задания массы балластной жидкости:

$$\Delta V_d = \frac{\partial V_d}{\partial m_{bd}} \Delta m_{bd} = \frac{1}{2\sqrt{(m - m_h - m_m - m_{bd})}} \sqrt{\frac{g \sin \xi_d}{(K_{D0} + K_D \alpha_d^2)}} \Delta m_{bd};$$

$$\delta_{V_d} = \frac{\Delta V_d}{V_d} = \frac{\Delta m_{bd}}{2(m - m_h - m_m - m_{bd})} \cdot 100\%.$$

Подставив значения, получим

$$\delta_{V_d} = 0,042\%.$$

На рис. 6 представлена зависимость относительной погрешности изменения скорости от величины балластной массы.

Из рис. 6 видно, что при изменении массы балластной жидкости в диапазоне $1 \pm 0,084$ кг погрешность изменения скорости будет минимальна при граничных значениях: 0,916 и 1,084 кг. При таких значениях балласта происходит погружение и всплытие. В случае нейтральной плавучести зонда ($m_b = 1$ кг) погрешность скорости резко возрастает.

Аналогичным образом определим погрешность угла планирования, используя формулу (8):

$$\Delta \xi = \frac{\partial \xi}{\partial r_{p1}} \Delta r_{p1} = - \frac{\cos(\theta) m_m g}{K_M (V_1^2 + V_3^2)}. \quad (9)$$

Погрешность угла планирования будет равна

$$\Delta \xi = 0,005^\circ.$$

Из соотношения (9) видно, что величина погрешности угла планирования не зависит от величины смещения подвижной массы.

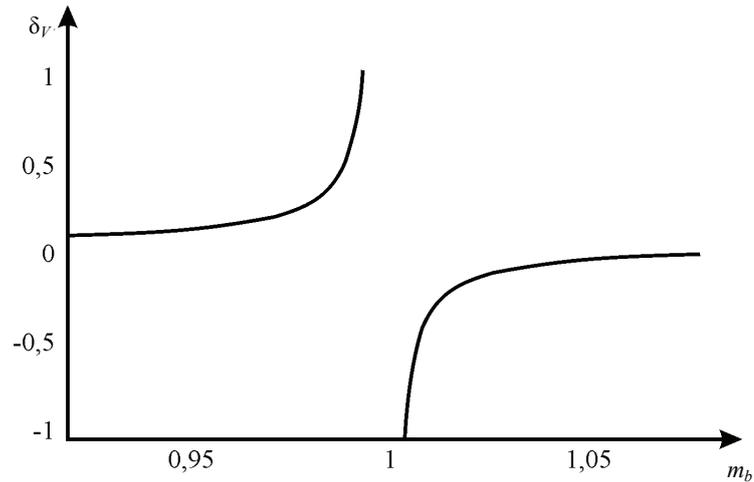


Рис. 6. Зависимость относительной погрешности изменения скорости от массы балласта

Определим погрешность координат X и Z при движении зонда:

$$X = Vt \cos \xi; \quad Z = Vt \sin \xi;$$

$$\delta_X = \frac{\Delta X}{X} = \frac{t \cos \xi \Delta V}{Vt \cos \xi} - \frac{Vt \sin \xi \Delta \xi}{Vt \cos \xi} = \delta_V - \operatorname{tg} \xi \Delta \xi;$$

$$\delta_Z = \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{t \sin \xi \Delta V}{Vt \sin \xi} + \frac{Vt \cos \xi \Delta \xi}{Vt \sin \xi} = \delta_V + \operatorname{ctg} \xi \Delta \xi;$$

$$\delta_X = 0,458 \%; \quad \delta_Z = 1,114 \%.$$

4. Коррекция траектории движения ПЗ

Для периодической коррекции траектории движения используются данные, полученные от измерительного блока. Алгоритм коррекции приведен на рис. 7.

Поясним работу алгоритма:

- 1) из запоминающего устройства (ЗУ) поступают заданные параметры движения (ξ_d, V_d) во времени;
- 2) измерительный блок (ИБ) измеряет эти же параметры (ξ, V);
- 3) вычисляется разность между измеренными и заданными параметрами $\Delta \xi = \xi - \xi_d; \Delta V = V - V_d$;
- 4) проверяется, превышает ли отклонение реальной траектории от заданной предельное значение, если да, то производится коррекция, нет – цикл начинается с начала;
- 5) вычисляются скорректированные параметры движения:

$$\xi_k = \xi_d - k_\xi \Delta \xi; \quad V_k = V_d - k_V \Delta V,$$

где k – коэффициент коррекции;

- 6) скорректированные параметры движения поступают в блок управления, где вырабатываются новые управляющие воздействия: изменение массы балластной жидкости m_b и положения подвижной массы l_{m1} ;

7) если движение не окончено, то цикл повторяется. В случае окончания движения происходит выход из цикла.

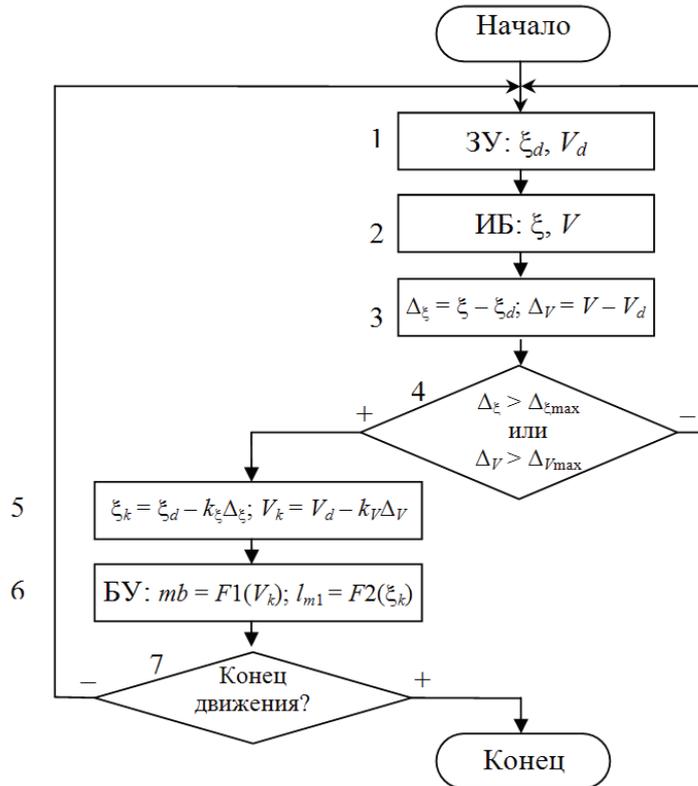


Рис. 7. Алгоритм коррекции траектории движения

Возможны и другие варианты алгоритма корректировки, к примеру, периодическая коррекция, т.е. изменение управляющих параметров в строго определенные интервалы времени.

Коэффициенты коррекции k_V и k_ξ определяют скорость приближения реальной траектории к заданной. Поясним сказанное на примере коррекции угла планирования (рис. 8).

На поверхности в точке A в соответствии с заданной траекторией задаются управляющие воздействия – смещение подвижной массы и масса балластной жидкости. Зонд погружается по траектории, показанной сплошной линией. В ходе движения текущие параметры движения измеряются и сравниваются с заданными. В определенный момент времени (в точке B) отклонение реальной траектории от заданной (штриховая линия) достигает предельного значения. В этот момент рассчитываются новые управляющие воздействия ($\xi_k = \xi_d - k_\xi \Delta\xi$; $V_k = V_d - k_V \Delta V$) и зонд начинает движение по траектории, обозначенной отрезком BC для приближения к заданной траектории.

При значении коэффициента коррекции $k_\xi = 2$ сближение составит путь BC , равный удалению AB .

В том случае, если бы коэффициенты коррекции по углу планирования равнялись разности измеренного и заданного углов ($k_\xi = 1$), траектория дви-

жения соответствовала бы штрихпунктирной линии, т.е. угол планирования стал бы равен заданному. В этом случае зонд продолжит свое движение параллельно заданной траектории движения.

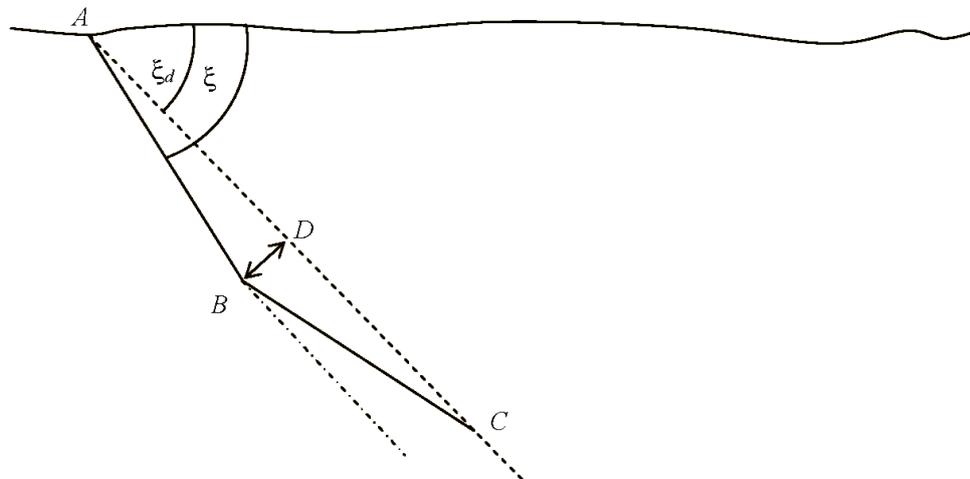


Рис. 8. Коррекция угла планирования

Заключение

Таким образом, на основании оценки погрешностей определения координат ПЗ сформированы требования к инструментальным погрешностям датчиков измерительного блока.

Анализ погрешностей информационно-измерительной и управляющей системы показал, что блок управления автоматически, в соответствии с заложенным в ЗУ маршрутом, управляет движением ПЗ с погрешностью в направлении оси $X - \delta_x = \pm 0,458\%$ и по глубине $\delta_z = \pm 1,114\%$. Оценка погрешности блока управления производилась только с учетом неточности установки управляющих воздействий – массы балластной жидкости и смещения подвижной массы. Измерительный блок, участвующий в формировании управляющих воздействий, должен определять координаты положения ПЗ с погрешностями $\delta_x = \pm 1\%$, $\delta_z = \pm 0,3\%$.

Использование коррекции позволяет уменьшить смещение траектории движения ПЗ от заданной до величины погрешности измерительного блока.

Список литературы

1. **Старков, Е. Г.** Управление движением планирующего научно-исследовательского зонда при исследовании параметров водной среды / Е. Г. Старков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия. Технические науки. – Самара, 2010. – С. 87–91.
2. **Агеев, М. Д.** Создание автоматизированной сети океанографических измерений на основе АНПА с солнечной энергетикой / М. Д. Агеев // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 2. – С. 5–12.
3. **Daniel, L.** Underwater Gliders for Ocean Research / L. Daniel et al. // Marine Technology Society Journal. – Spring 2004. – V. 38, № 1. – P. 48–59.

Старков Евгений Геннадьевич

аспирант, Самарский государственный
технический университет

E-mail: Starkov-Evgenij@yandex.ru

Starkov Evgeny Gennadyevich

Postgraduate student,
Samara State Technical University

Куликовский Константин Лонгинович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники, Самарский государственный
технический университет

E-mail: Starkov-Evgenij@yandex.ru

Kulikovsky Konstantin Longinovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information measuring
technology, Samara State Technical
University

УДК 681.518.3

Старков, Е. Г.

Коррекция траектории движения научно-исследовательских планирующих подводных зондов / Е. Г. Старков, К. Л. Куликовский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 58–69.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦВЕТНЫМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ ПРОЦЕССА РЕГИСТРАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Рассматриваются вопросы моделирования подсистемы регистрации радиолокационной станции временными раскрашенными сетями Петри. Предложенная модель позволяет оценивать взаимное влияние информационных потоков через сеть Gigabit Ethernet.

Ключевые слова: моделирование, раскрашенные сети Петри, Ethernet, регистрация радиолокационного сигнала.

Abstract. The article considers a problem of modeling a subsystem of radar data registration by means of timed colored Petri nets. An introduced model can be used for interference estimation between data flows in Gigabit Ethernet.

Key words: simulation, colored Petri nets, Ethernet, registration of radar signal.

Введение

При разработке алгоритмов обработки радиолокационных сигналов, отладке и испытаниях комплексов дальнего радиолокационного обнаружения (ДЛРЛО) нашли применение аппаратно-программные средства регистрации и анализа радиолокационных сигналов, которые обеспечивают запись потоков данных в трактах приемообработки бортовой радиолокационной станции (РЛС) с их временно-азимутальной привязкой и последующий анализ данных на ЭВМ [1, 2].

В статье рассмотрены вопросы моделирования подсистемы регистрации РЛС временными раскрашенными сетями Петри и проведена оценка взаимного влияния информационных потоков через сеть Gigabit Ethernet.

1. Описание объекта исследования

Укрупненная структурная схема регистрации радиолокационных сигналов в перспективном комплексе ДЛРЛО представлена на рис. 1.

С выхода приемной части РЛС реализации эхо-сигнала от зондирующих импульсов, подвергнутого квадратурному преобразованию частоты в нулевую область (DDC преобразование), поступают на вход спецвычислителя, производящего обработку в соответствии с режимом РЛС для обнаружения целей.

Контроллер, представляющий собой встроенную ЭВМ, завершает первичную обработку радиолокационной информации, формируя кодограммы формуляров целей и направляя их через сеть бортовой информационно-управляющей системы (БИУС), реализованной по технологии коммутируемого Gigabit Ethernet «потребителям» – ЭВМ, выполняющим вторичную и последующие обработки радиолокационной информации [3].

Концентратор выполняет съем данных с контрольных точек спецвычислителя, их форматирование (снабжение служебными заголовками) и передачу в контроллер, который передает их периодически через сеть БИУС в регистратор, представляющий собой ЭВМ в промышленном исполнении с накопителем на сменных твердотельных дисках.

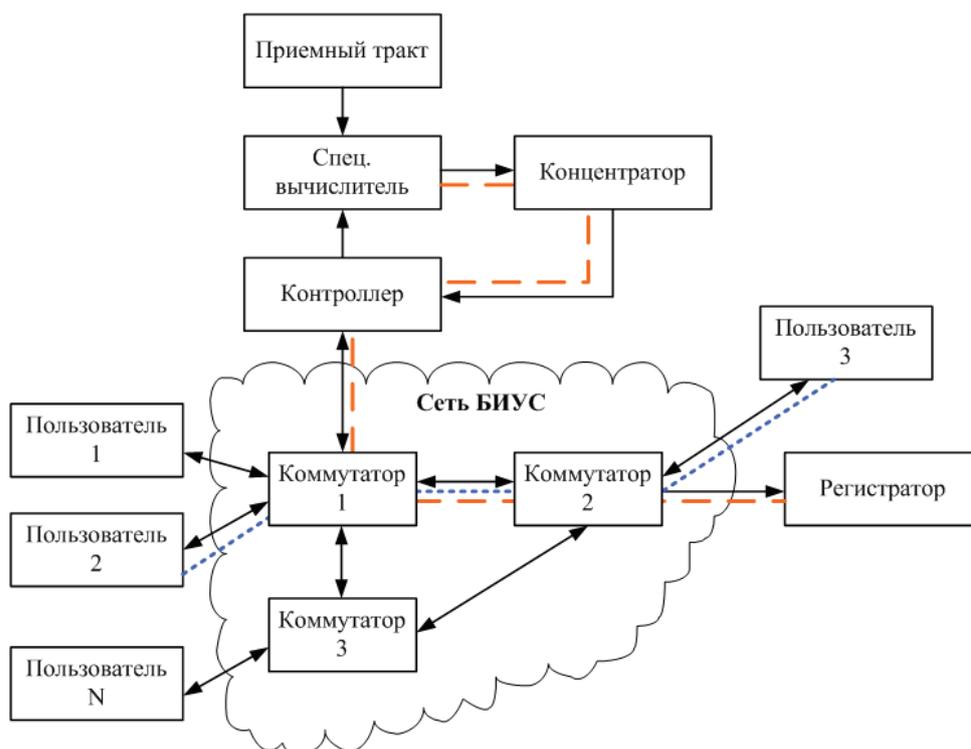


Рис. 1. Структурная схема регистрации радиолокационных сигналов

Поток данных, направляемый на регистрацию, может достигать сотен Мбит/с и действует в течение нескольких минут. В связи с этим возникают следующие задачи:

- формирование потока данных, снимаемых с аппаратуры РЛС (определение форматов, размеров буферов в концентраторе и контроллере, а также алгоритма формирования передаваемого потока);
- организация передачи потока регистрируемых данных через сеть БИУС (оценка влияния потока регистрации на работу сети, выбор алгоритма обслуживания потока в сетевом оборудовании);
- организация регистрации на носителе (оценка требуемой пропускной способности ЭВМ регистратора, разработка алгоритма взаимодействия сетевого подключения, оперативной и дисковой памяти).

2. Описание модели

В связи со сложностью аналитического описания системы автором для решения указанных задач предлагается использовать имитационные методы иерархических временных раскрашенных сетей Петри, которые представляют собой универсальную алгоритмическую систему, позволяющую описывать алгоритмически сложные объекты [4]:

- свойства «цвета» позволяют описывать алгоритмы обработки, зависящие от параметров обрабатываемых потоков данных;
- иерархичность позволяет строить сложные многокомпонентные модели;
- свойство времени обеспечивает возможность моделирования динамических характеристик объекта.

В качестве инструментальной системы моделирования выбран свободно распространяемый пакет CPN Tools, что обусловлено его гибкостью и широкими возможностями.

Для улучшения выразительных свойств модели решено строить ее в виде иерархической сети и вести разработку методом нисходящего проектирования. Верхний уровень модели представлен на рис. 2 и включает следующие компоненты:

- формирователь потока регистрации из РЛС, который моделируется сложным переходом **SIGNAL SOURCE**, вырабатывающим последовательно-сти маркеров, соответствующих кадрам Gigabit Ethernet с регистрируемыми данными;
- сеть БИУС, которая представлена сложным переходом **NET**;
- приемник потока регистрации представлен сложным переходом **REGISTRATOR**.

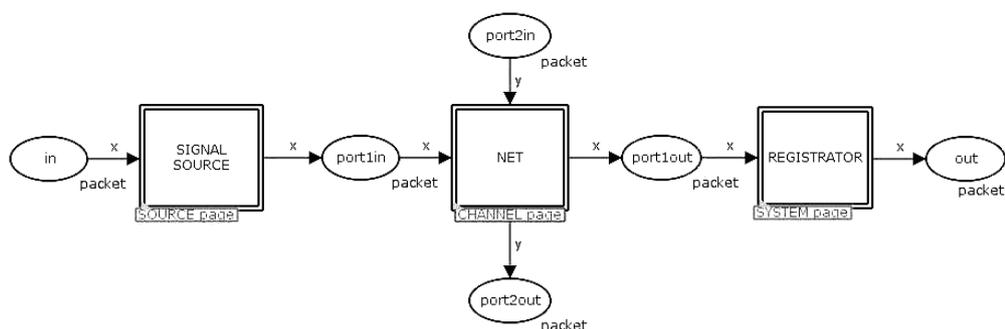


Рис. 2. Верхний уровень модели

Кроме того, модель содержит генератор исходных данных, поступающих в позицию **in** сложного перехода **SIGNAL SOURCE**, и генератор рабочего потока БИУС, поступающего в **port2in** сложного перехода **OTHER SYSTEMS**. Эти генераторы реализуются стандартными средствами CPN Tools и на схеме не показаны.

Опыт работы с пакетом CPN Tools показал, что исследование модели целесообразно проводить для каждого компонента отдельно ввиду требуемых значительных вычислительных ресурсов.

В настоящей работе рассматривается моделирование прохождения потока регистрируемой информации через сеть БИУС и ее влияние на рабочий поток информации.

Известны работы, посвященные моделированию коммутаторов Ethernet [5, 6]. Из них следует, что очереди формируются на выходных портах коммутатора. Задача вырождается в задачу прохождения трафика через транзитный порт линка, связывающего коммутаторы 1 и 2 (рис. 1), через который проходит агрегатный трафик, объединяющий рабочий поток БИУС и поток регистрации. Эта связь является узким местом сети, поэтому ее следует исследовать путем моделирования, для чего необходимо решить вспомогательные задачи:

- построить модель источника для разных режимов работы РЛС и оценить загрузку канала;

- оценить влияние размера буфера в концентраторе на загрузку канала;
- оценить влияние различных алгоритмов арбитража в коммутаторе (равноправные потоки, приоритетное обслуживание);
- оценить влияние потока регистрации на фоновый поток (джиттер прихода пакетов, среднее время ожидания в очереди) при различных режимах работы РЛС;
- оценить пропускную способность канала связи при условии, что через него протекает поток регистрации и фоновый поток.

При проведении исследования будем использовать следующие показатели эффективности:

- загрузка буферов;
- загрузка каналов связи;
- наличие переполнения.

Использование технологии коммутируемого Ethernet, с одной стороны, обеспечивает высокую производительность сети, с другой – вносит неопределенную задержку из-за буферизации кадров в коммутаторах, что отрицательно сказывается на работе чувствительных к задержкам и потерям приложений. Методы обеспечения качества обслуживания (QoS) предоставляют гибкие механизмы перераспределения имеющейся пропускной способности сети между приложениями [5].

Обслуживание в сети рабочего и регистрируемого потоков по методу QoS Best Effort Service (негарантированная доставка) в данном случае нежелательно, так как приведет к значительным задержкам и потерям рабочего трафика, потому что полоса пропускания сети может занимать поток регистрации. Поэтому будем рассматривать сеть с поддержкой приоритетного обслуживания (рис. 3).

Основной единицей передачи данных является кадр Ethernet. Направления дуг соответствуют направлению движения информационных потоков.

Позиции **port1in**, **port2in**, **port1out**, **port2out** представляют собой входные и выходные порты сложного перехода NET. Данные позиции имеют множество цветов **packet**, которое представляет собой кадр Ethernet и описывается следующим образом:

```
colset pnum = int;  
colset psize = int;  
colset time_ = int;  
colset packet = product pnum * psize * time_ timed;
```

Маркеры, имеющие цвет **packet**, описываются тремя параметрами: **pnum** – номер кадра, **psize** – размер кадра в информационных блоках (ИБ), используемый для расчета задержки; **time** – модельное время создания кадра, которое учитывается при расчете общего времени пребывания кадра в очередях. Размер кадра Ethernet и его отдельных полей представляется в ИБ. Например, размер служебной информации в кадре составляет 18 байт, т.е. 2 ИБ.

В данной модели используются следующие описания:

```
var cap: INT;  
var cnt: INT;  
var x: packet;  
var y: packet;
```

```

colset signal = bool timed;
var en: signal;
colset PACKETS = list packet timed;
var packets: PACKETS;
var packets1 : PACKETS;
var packets2 : PACKETS;
fun ChDelay (packet_sz : int, chan_delay : int) = packet_sz *
chan_delay;
val gbe_delay = 76;
val gbe_IPG = 96;
val net_buf_sz = 10000.
    
```

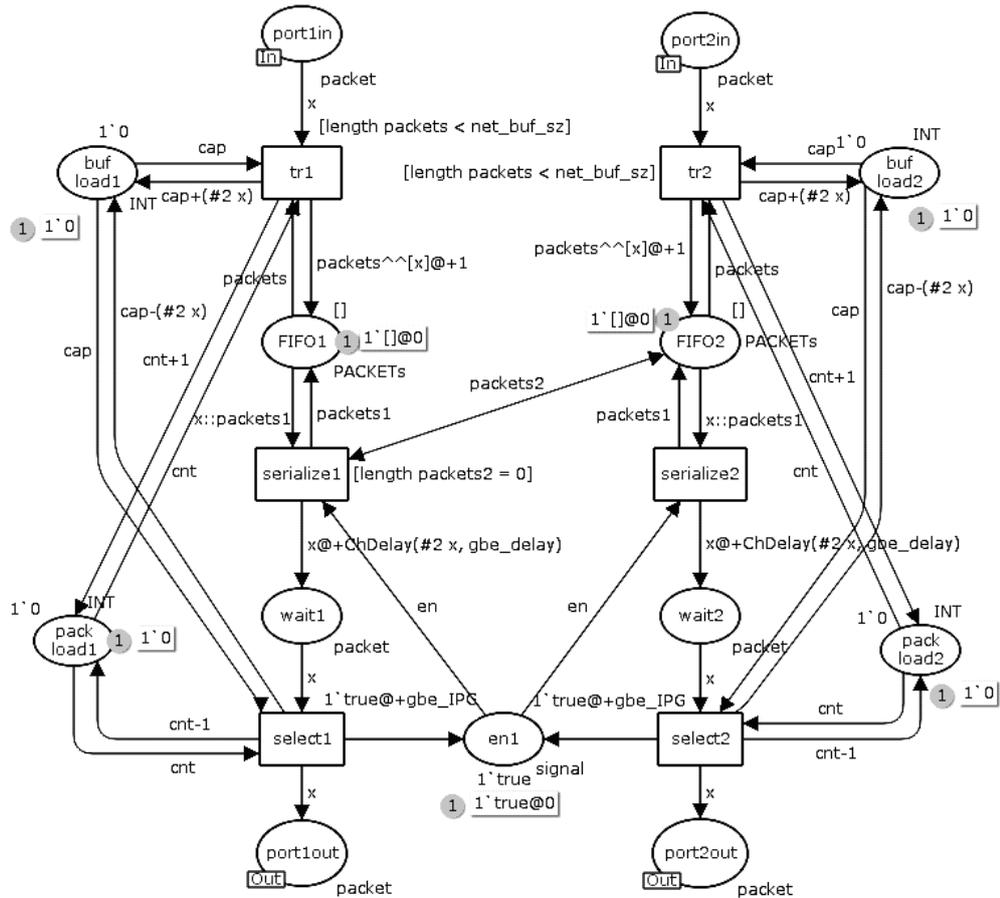


Рис. 3. Модель коммутатора с приоритетным обслуживанием

Предлагаемая модель сети имеет два канала, входные и выходные порты которых представлены в виде позиций **port1in**, **port2in** и **port1out**, **port2out** соответственно. Эти позиции имеют множество цветов **packet**, т.е. попадающие в них фишки символизируют собой кадры Ethernet. Позиции входных портов соединены дугами с переходами **tr1** и **tr2**.

Условием срабатывания данных переходов является выполнение неравенства **length packets < net_buf_sz**, где **length packets** – суммарный размер пакетов, пребывающих в очереди, а **net_buf_sz** – размер буфера. Пакет CPN

Tools предоставляет удобное средство моделирования очередей – список (**list**), для определения размера которых используется встроенная функция **length**. Она возвращает число маркеров в списке. Если число пакетов в очереди превышает некоторое значение, пакет теряется. В данном исследовании считается, что очередь бесконечна, поэтому константа **net_buf_sz** установлена большим значением 100000.

Буферы первого и второго каналов коммутатора организованы в виде списков в позициях **FIFO1** и **FIFO2**. При срабатывании перехода **trx**, т.е. при наличии свободного места в буфере коммутатора, прибывший кадр присоединяется к списку. Список также является меткой, имеющей цвет **PACKETS**.

После позиции **FIFO** фишки через переход **serialize** переходят в позицию **wait**. При этом из списка будет выбрана фишка в соответствии с правилом «первым вошел, первым вышел». Механизм приоритетного обслуживания реализован в модели с помощью перехода **serialize**. Переход в первом канале сработает только в том случае, если очередь во втором канале пуста. Таким образом, второй канал коммутатора имеет высший приоритет. Вторым условием срабатывания перехода **serialize** является отсутствие заявки в позиции **wait**, т.е. условие, что в данный момент ничего не передается. Это можно описать следующим выражением:

Serialize1 = (FIFO2 == 0)&&(not (wait1 || wait1));

Serialize2 = not (wait1 || wait1);

Дуги из переходов **serializex** в состояния **waitx** обоих каналов моделируют задержку сериализации. Для этого используется функция **ChDelay**, которая определяет задержку на передачу кадра, исходя из размера кадра в информационных блоках, и задержку на передачу одного информационного блока. Размер кадра берется из параметров маркера. Задержка на передачу одного ИБ в сети Ethernet установлена константой **gbe_delay**.

Когда фишка переходит из позиции **wait** в позицию **port_out**, к ней добавляется минимальный межкадровый интервал (IPG) при прохождении переходов **selectx**. Для сети Gigabit Ethernet он равен 96 нс.

Пакет CPN Tools предоставляет средства сбора статистики по модели – мониторы. Мониторы представляют собой позиции либо переходы, осуществляющие запись в лог файл информации при наступлении определенного события.

В данном случае потребовалось организовать 4 монитора: позиции **bufload1**, **bufload2**, **packload1**, **packload2**. Первые два отслеживают длину очереди в байтах, два других – длину очереди в пакетах. Каждый раз, когда в список попадает очередной маркер или маркер покидает список, в лог-файл записывается сообщение.

Построенная модель позволяет оценить загрузку буферов коммутатора в байтах и в пакетах, джиттер прихода пакетов потока регистрации и рабочего потока.

3. Результаты исследования модели

Рассмотрим свойства потоков. Трафик потока регистрации имеет квазипериодический характер, его параметры зависят от режима работы бортовой РЛС (квазинепрерывное или низкочастотное излучение) и алгоритма

упаковки регистрируемых данных в кадры Ethernet в контроллере. Будем считать, что контроллер накапливает данные, упаковывает их в кадры Ethernet максимальной длины (полезная нагрузка – 1500 байт) и с постоянным периодом передает в сеть, т.е. формирует регулярную последовательность кадров.

Рабочий поток в сети БИУС является случайным. Будем считать, что процесс поступления кадров рабочего потока описывается пуассоновским распределением, хотя это не совсем точно отражает рассматриваемую систему. Рабочий поток состоит из команд, квитанций и формуляров целей, которыми обмениваются потребители. Так как квитанции высылаются узлом в ответ на принятую им команду, то трафик можно также рассматривать как самоподобный, однако это свойство учитывать не будем, так как квитанция обычно занимает не более одного кадра Ethernet.

Более серьезная ситуация возникает, когда коэффициент использования разделяемого канала близок к единице. Подсистема регистрации является системой реального времени, т.е. на длительность выполнения команд наложены жесткие ограничения. При высокой загрузке канала увеличивается время пребывания пакетов в очередях. Если это время превысит допустимое значение, определенное в некотором узле, узлом будут повторно запрошены данные, что приведет к лавинообразному увеличению трафика. Поэтому важно при исследовании системы отслеживать время пребывания пакетов фоновых потоков в очередях. Будем считать, что производительность системы неудовлетворительна, если это время превысит критическое значение. Считаем, что длина кадров рабочего потока имеет равномерное распределение между максимальным и минимальным значениями, определенными для Gigabit Ethernet.

При исследовании модели были выбраны тестовые значения средней скорости передачи данных: для потока регистрации: 130, 260 и 450 Мбит/с, а для рабочего потока: 200, 250, 300, 350, 400 Мбит/с.

На рис. 4 показана загрузка буфера коммутатора с равноправными потоками для максимального значения скорости потока регистрации (45 % от пропускной способности Gigabit Ethernet) при различных значениях скорости фоновых потоков. На рис. 5 приведены гистограммы распределения длины очередей для различных механизмов обслуживания потоков при их наивысшей средней скорости.

Как уже было отмечено, рабочий поток является чувствительным к задержкам. В табл. 1 приведены значения времени, затраченного на передачу пакетов рабочего потока и потока регистрации. Даже в случае, когда пропускная способность канала связи задействована на 85 %, время пребывания пакетов рабочего потока в очереди не превышает 23 мкс. При использовании равноправного механизма обслуживания максимальное время пребывания в очереди обоих потоков практически одинаково.

Заключение

1. Исследование системы методом имитационного моделирования показало, что при использовании механизма приоритетного обслуживания в коммутаторе поток регистрации не сказывается на рабочем потоке.

2. Построенная модель не является узко специализированной. Она может использоваться при оценке пропускной способности сети, по которой

пропускаются потоки информации, один из которых является чувствительным к задержкам.

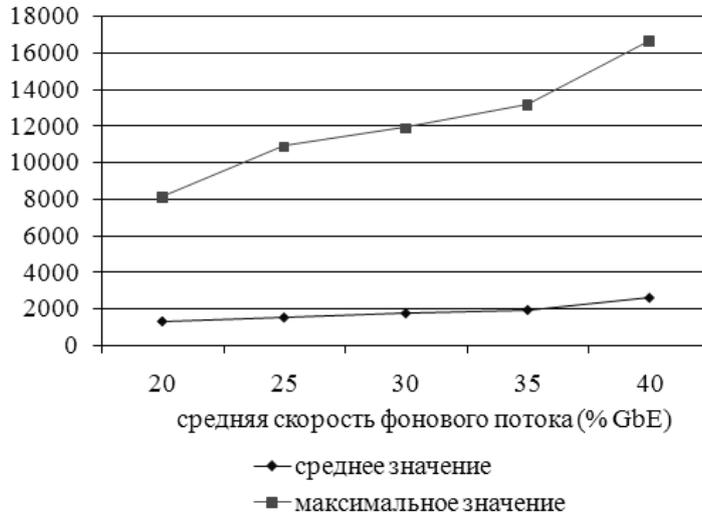
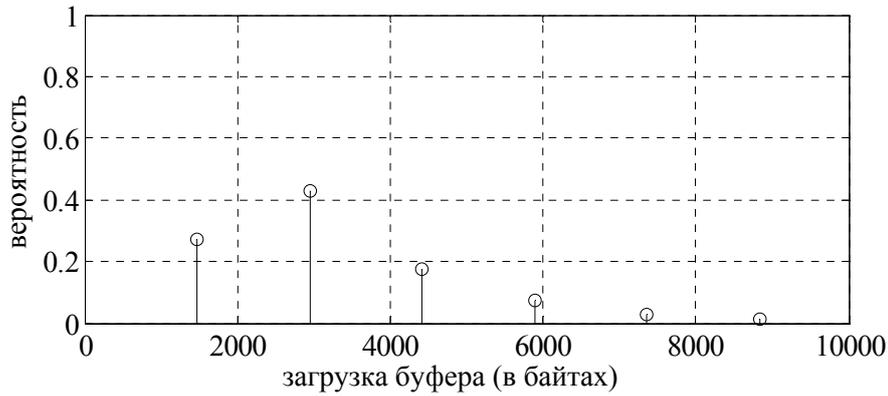
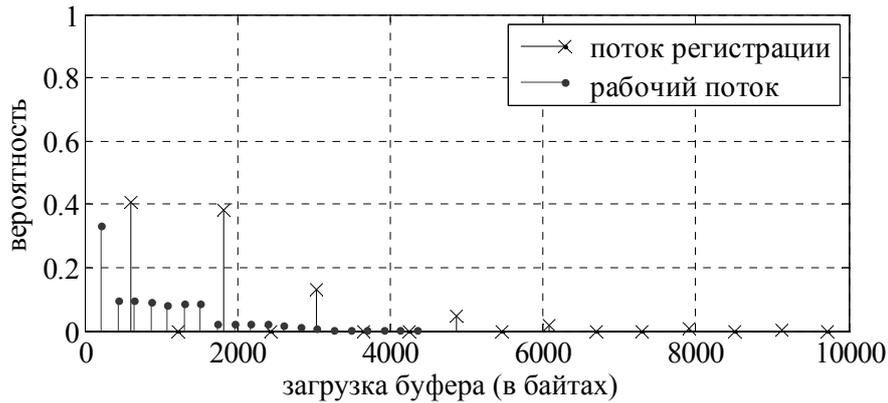


Рис. 4. Загрузка буфера (в байтах)



а)



б)

Рис. 5. Гистограмма размеров очереди:
а – равноправное обслуживание; б – приоритетное обслуживание

Время пребывания в очереди

Поток	Поток регистрации	Фоновый поток	Приоритетный канал	
			поток регистрации	фоновый поток
Среднее время в очереди (мкс)	21	21	29	12
Максимальное время в очереди (мкс)	128	123	250	23

Список литературы

1. **Васильев, А. В.** Аппаратно-программный комплекс для регистрации и имитации радиолокационной информации / А. В. Васильев и др. // Новые информационные технологии и системы : труды VII Международной научно-технической конференции. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – Ч. 2. – С. 82–85.
2. **Коннов, Н. Н.** Программный комплекс для анализа сигналов РЛС / Н. Н. Коннов, Р. Н. Федюнин, Е. К. Таранцев, М. И. Чернышев // Новые информационные технологии и системы : труды IX Международной научно-технической конференции. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 195–200.
3. **Верба, В. С.** Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденция развития / В. С. Верба. – М. : URSS, 2008. – 432 с.
4. Coloured Petri Nets: modelling and validation of concurrent systems / K. Jensen, L. Kristensen. – Springer. – Verlag, 2009. – P. 384.
5. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2010. – 944 с.
6. **Механов, В. Б.** Применение сетей Петри для моделирования механизмов обеспечения QoS в компьютерных сетях / В. Б. Механов // Новые информационные технологии и менеджмент качества (NIT&MQ'2010) : материалы Международного симпозиума. – М. : ЭГРИ, 2010. – С. 209–214.

Таранцев Евгений Константинович
аспирант, Пензенский
государственный университет

Tarantsev Evgeny Konstantinovich
Postgraduate student,
Penza State University

E-mail: etar@bk.ru

УДК 004.94

Таранцев, Е. К.

Моделирование цветными сетями Петри процесса регистрации радиолокационной информации / Е. К. Таранцев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 70–78.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАЗЕМНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК В АЭРОПОРТУ

Аннотация. Сформирована имитационная модель технологических процессов обслуживания воздушных судов, пассажиров и багажа в аэропорту. В производственном процессе аэропорта выделены важнейшие технологические операции, установлены их роль и место в сетевом технологическом графике наземного обслуживания рейсов. На базе обширного статистического материала, предоставленного рядом аэропортов РФ, построены вероятностные модели технологических операций, устанавливающие связи между их важнейшими параметрами и характеристиками обслуживаемых рейсов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, аэропорт, наземное обслуживание, информационная система.

Abstract. The article describes a simulation model of technological processes of aircrafts, passengers and luggage services in the airport. Regarding airport production processes the author points out major technological operations and their part in the network technological schedule of flights ground maintenance. On the basis of the extensive statistical material given by a number of airports of the Russian Federation, the author has constructed stochastic models of technological operations establishing communications between their key parameters and characteristics of flight maintenance.

Key words: simulation modeling, airport, ground maintenance, information system.

Введение

Современные условия авиатранспортного рынка требуют от аэропортовых предприятий повышения качества предоставляемых перевозчикам и пользователям воздушного транспорта услуг при сокращении временных затрат на обслуживание и обеспечение требований по безопасности и регулярности перевозок. Одним из направлений практического решения этой проблемы является оптимизация технологических параметров аэропортовых комплексов на базе имитационного компьютерного моделирования.

Имитационное моделирование предполагает многократное воспроизведение (прогон) на ЭВМ процесса функционирования исследуемой системы с сохранением его логической структуры и последовательности протекания во времени и учетом воздействия случайных факторов [1]. Поскольку основная производственная деятельность аэропорта состоит в реализации технологических процессов обслуживания рейсов, включающих определенный набор операций, состав, длительность и трудоемкость которых зависит от параметров рейса, то в качестве единичного прогона модели принимается процесс обслуживания одного рейса. Имитационная модель технологических процессов наземного обслуживания рейса должна содержать:

- 1) универсальный алгоритм осуществления процесса, содержащий описание последовательности и взаимосвязи формирующих его операций;
- 2) вероятностные модели отдельных технологических операций, включающие статистические распределения ключевых параметров операций, та-

ких как временная продолжительность, численность привлекаемого персонала, количество используемых технических средств и т.п.

Рациональные ограничения по уровню детализации требуют, чтобы создаваемая модель отражала лишь тот набор технологических операций, который принципиально важен при оптимизации процесса обслуживания перевозок. Для формирования такого набора операций следует:

1) рассмотреть технологию обслуживания рейсов, выделив основные операции, в наибольшей степени влияющие на общую продолжительность обслуживания и используемые ресурсы. Результатом этой процедуры должен явиться модельный технологический график, включающий операции критического пути, справедливый для подавляющего большинства типов воздушных судов (ВС);

2) провести анализ летно-технических и коммерческих характеристик, а также параметров технологических процессов наземного обслуживания различных типов ВС с целью обоснованного их группирования, позволяющего значительно снизить объем исходных данных, используемых моделью;

3) построить модели технологических операций, входящих в модельный технологический график. Результатами этих моделей должны быть продолжительности описываемых операций и потребные для их выполнения ресурсы.

1. Формирование модельного технологического графика наземного обслуживания воздушных перевозок

Характеристики технологических процессов, такие как состав и продолжительность технологических операций, задействованные силы и средства зависят от многих факторов, главными из которых являются тип обслуживаемого ВС, категории рейса и перевозки, уровень механизации и автоматизации технического обслуживания. Наиболее полным составом выполняемых операций наземного обслуживания отличаются рейсы, относящиеся к категории обратных и, в несколько меньшей степени, транзитных [2]. Дальнейший анализ ограничен этими двумя видами рейсов.

Непосредственное использование в имитационной модели реальных технологических графиков обслуживания рейсов, разрабатываемых и применяемых в действующих аэропортах, невозможно в силу целого ряда причин, среди которых наиболее существенные – это, во-первых, разнообразие вариантов графиков, различающихся в зависимости от типа обслуживаемого ВС, категорий рейса и перевозки и т.п.; во-вторых, чрезмерная детализация отображаемого процесса обслуживания. Тем не менее имеющиеся графики могут быть использованы в качестве основы для построения редуцированного модельного технологического графика. Операции, включаемые в этот график, должны удовлетворять трем требованиям:

1) выполняться обязательно или в подавляющем большинстве случаев при обслуживании транзитных или обратных рейсов;

2) находиться (или возможно находиться) на критическом пути процесса;

3) иметь значительную, существенную для рассматриваемого уровня детализации модели продолжительность.

Модельный технологический график, включающий операции, обладающие вышеперечисленными свойствами, и справедливый для описания процесса обслуживания большинства типов ВС, приведен на рис. 1. Несмотря на

то, что параметры операций зависят от типа ВС, значения их меняются в широких пределах, а в ряде случаев некоторые из операций вообще исключаются из технологического процесса, это не приводит к нарушению связей между операциями и «разрушению» графика.

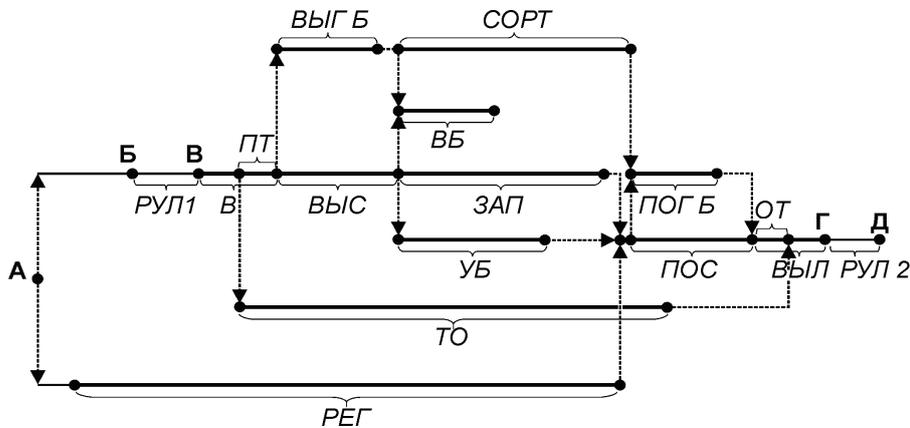


Рис. 1. Модельный технологический график подготовки ВС к вылету:
 События: А – поступление сообщения о движении ВС, Б – посадка ВС, В – прибытие ВС на место стоянки (МС), Г – отправление ВС с МС, Д – вылет ВС.
 Операции (или временные интервалы): РЕГ – регистрация билетов и оформление багажа вылетающих пассажиров; РУЛ 1 – движение ВС на МС; В – встреча ВС на МС; ПТ – установка трапа; ВЫС – высадка и доставка в аэровокзал пассажиров; ВЫГ Б – выгрузка багажа и транспортировка его в багажные помещения аэровокзала; ВБ – выдача багажа прилетевшим пассажирам; ЗАП – заправка ВС топливом; УБ – уборка салона; ТО – работы по ТО; ПОС – доставка вылетающих пассажиров к ВС и посадка в ВС; СОРТ – сортировка и комплектация по рейсам багажа вылетающих пассажиров; ПОГ Б – транспортировка к ВС и погрузка багажа вылетающих пассажиров; ВЪЛ – работы по выпуску ВС со стоянки; ОТ – уборка трапа; РУЛ 2 – движение ВС с МС

2. Автоматизированные информационные системы аэропортов как источник статистических данных для имитационного моделирования

Имитационное моделирование, основывающееся на использовании вероятностной модели исследуемых процессов, предполагает наличие статистических данных, описывающих эти процессы. При этом точность и адекватность модели возрастает с увеличением объема накопленной статистики. Внедрение в ряде аэропортов автоматизированных информационных систем (ИС) управления производственной деятельностью позволяет избежать длительных и трудоемких процедур сбора статистики путем использования материалов, хранящихся в базах данных (БД) этих систем, которые подробно и всесторонне описывают технологические процессы аэропорта.

Статистические данные, почерпнутые из БД ИС, служат исходным «сырьем» для построения вероятностных распределений характеристик технологических операций. В данной работе для создания моделей технологических операций (за исключением заправки топливом) используются материалы БД ИС крупного российского аэропорта, одного из ведущих аэропортов Приволжского федерального округа, условно названного «Аэропорт N».

По ряду причин данные, характеризующие заправку ВС топливом, отсутствуют в БД ИС аэропорта *N*. Поэтому здесь использована статистика, накопленная в течение 2004–2006 гг. в БД аналогичной ИС сравнительно небольшого аэропорта, расположенного в пределах нефтегазоносного региона Западной Сибири, называемого далее «Аэропорт *K*».

Проведенный анализ статистического материала позволил провести группирование ВС, обслуживаемых в рассматриваемых аэропортах, с выделением трех совокупностей. Эти совокупности названы здесь «категории ВС». Наиболее характерные для исследуемых аэропортов ВС распределились по категориям следующим образом:

Категория I – Ту-154, В-757-200, В-737-400, А-320.

Категория II – Ту-134, Як-42, В-737-200, В-737-500, А-319.

Категория III – Ан-24, Як-40.

Анализ статистики выявил зависимость характеристик операций не только от типа ВС, но и от категории перевозки – на международных (МВЛ) или внутренних (ВВЛ) воздушных линиях. ВС категории III на МВЛ не использовались. Обслуживание ВС меньших категорий не рассматривалось.

3. Вероятностные модели технологических операций наземного обслуживания

Построение модельного технологического графика и выделение совокупностей ВС (с учетом категории перевозки) позволяет перейти к формированию статистических моделей отдельных операций для каждой совокупности. Указанные модели должны отражать связи между продолжительностями операций, численностью привлекаемого персонала и технических средств, их техническими характеристиками и другими параметрами.

Результаты обработки статистических данных ИС аэропорта *N*, содержащие параметры эмпирических и сглаживающих теоретических распределений продолжительности 14 важнейших операций и интервалов времени, приведены в табл. 1. В графическом виде распределения для ВС II категории, выполняющих рейсы на ВВЛ, представлены в качестве примера на рис. 2.

В табл. 1 и на рис. 2 использованы следующие обозначения: n – объем выборки – число рейсов соответствующих категорий, информация о которых использовалась в ходе статистического анализа; $\bar{\mu}$ – выборочное среднее; \bar{k} – выборочный коэффициент вариации ($\bar{k} = \bar{\sigma} / \bar{\mu}$, где $\bar{\sigma}$ – выборочное среднее квадратическое отклонение); ρ^* – уровень значимости критерия согласия χ^2 Пирсона; t – продолжительность выполнения операции (или интервала времени) – случайная величина; a – эмпирическое число наблюдений, попавших в определенный интервал; a^* – теоретическая оценка числа наблюдений.

Исследованы материалы, характеризующие обслуживание около 2000 оборотных рейсов, выполненных самолетами различных типов на МВЛ и на ВВЛ в течение 2007–2008 гг.

Для оценки ошибок выборок использовалась формула [3]:

$$S_{\bar{x}} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{n}{N}}.$$

Таблица 1

Характеристики технологических операций модельного графика

Операция	Параметры распределений	Категории ВС и рейса								
		I			II			III		
		ВВЛ	МВЛ	ВВЛ	МВЛ	ВВЛ	МВЛ	ВВЛ	МВЛ	ВВЛ
1	2	3	4	5	6	7				
	<i>n</i>	538	97	452	161	537				
	$\bar{\mu}$, мин	54,63	124,38	52,57	99,26	42,89				
	\bar{k}	0,17	0,23	0,11	0,36	0,32				
	α ; β ; s , мин	12,40; 2,61; 22,23	19,19; 6,48; 0,00	4,86; 2,66; 39,65	5,71; 14,76; 15,00	8,06; 4,83; 4,00				
Регистрация билетов	ρ *	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01				
	<i>n</i>	564	100	584	167	392				
	$\bar{\mu}$, мин	11,02	12,63	7,91	9,45	5,40				
	\bar{k}	0,28	0,35	0,33	0,48	0,60				
	α ; β ; s , мин	5,18; 1,35; 4,03	4,67; 2,04; 3,10	2,91; 1,51; 3,52	2,63; 2,79; 2,11	1,42; 2,70; 1,57				
Высадка пассажиров	ρ *	0,05	0,48	0,00	0,48	0,21				
	<i>n</i>	531	96	600	161	596				
	$\bar{\mu}$, мин	16,96	26,13	15,28	20,86	11,42				
	\bar{k}	0,41	0,40	0,47	0,81	0,56				
	α ; β ; s , мин	5,99; 2,83; 0,00	4,62; 4,85; 3,73	4,42; 3,45; 0,00	1,52; 13,74; 0,00	3,21; 3,56; 0,00				
Посадка пассажиров	ρ *	0,12	0,88	0,08	0,47	0,06				
	<i>n</i>	552	94	476	170					
	$\bar{\mu}$, мин	13,05	14,19	10,95	12,07					
	\bar{k}	0,44	0,44	0,53	0,62					
	α ; β ; s , мин	3,75; 2,95; 1,99	5,05; 2,81; 0,00	3,35; 3,17; 0,33	1,85; 5,51; 1,88	нет данных				
Выгрузка багажа	ρ *	0,06	0,50	0,07	0,29					

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Погрузка багажа	n	559	101	467	165	нет данных
	$\bar{\mu}$, мин	16,95	24,53	14,95	20,24	
	\bar{k}	0,43	0,45	0,49	0,71	
	$\alpha; \beta; s$, мин	4,77; 3,32; 1,10	4,81; 5,10; 0,00	4,19; 3,57; 0,00	1,97; 10,27; 0,00	
	ρ^*	0,86	0,22	0,06	0,70	
Уборка салона	n	527	100	352	162	705
	$\bar{\mu}$, мин	24,90	29,30	16,81	22,98	12,61
	\bar{k}	0,33	0,51	0,36	0,38	0,43
	$\alpha; \beta; s$, мин	9,12; 2,73; 0,00	3,81; 7,69; 0,00	3,26; 3,32; 5,99	6,86; 3,35; 0,00	1,80; 4,03; 5,36
	ρ^*	0,10	0,08	0,07	0,70	0,06
Установка трапа	$K_{уборк}$, %	96,28	84,21	80,75	81,3	91,58
	n				91	
	$\bar{\mu}$, мин				2,18	
	\bar{k}		нет данных		0,41	
	$\alpha; \beta; s$, мин		нет данных		3,77; 0,50; 0,00	
Уборка трапа	ρ^*				0,54	
	n				91	
	$\bar{\mu}$, мин				2,09	
	\bar{k}		нет данных		0,44	
	$\alpha; \beta; s$, мин		нет данных		4,73; 0,40; 0,00	
				0,21		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Транзитное ТО	n	525		48		705
	$\bar{\mu}$, мин	65,97		45,62		12,45
	\bar{k}	0,35		0,34		0,42
	$\alpha; \beta; s$, мин	1,73; 17,32; 36,00		4,80; 7,17; 11,20		1,43; 4,37; 6,21
	ρ^*	0,07		0,28		0,07
Выдача багажа	n	360	193	962	62	
	$\bar{\mu}$, мин	28,94	52,25	25,60	47,42	
	\bar{k}	0,77	0,51	0,79	0,63	
	$\alpha; \beta; s$, мин	1,70; 17,02; 0,00	2,55; 16,57; 10,00	1,60; 16,00; 0,00	2,02; 21,08; 5,00	
	ρ^*	0,06	0,09	0,05	0,08	
От посадки до встречи	n	466	87	545	152	15
	$\bar{\mu}$, мин	12,58	12,89	10,78	12,92	10,19
	\bar{k}	0,29	0,29	0,33	0,32	0,15
	$\alpha; \beta; s$, мин	9,01; 1,23; 1,50	8,60; 1,27; 2,00	9,32; 1,16; 0,00	7,29; 1,54; 1,71	
	ρ^*	0,20	0,73	0,06	0,37	
От выпуска до вылета	n	437	77	409	110	5
	$\bar{\mu}$, мин	6,28	7,33	6,77	7,94	10,54
	\bar{k}	0,36	0,40	0,43	0,36	0,43
	$\alpha; \beta; s$, мин	6,46; 0,90; 0,50	4,67; 1,35; 1,00	4,00; 1,44; 1,00	4,22; 1,41; 2,00	
	ρ^*	0,00	0,54	0,49	0,28	

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
От встречи до подгона трапа	n	375	73	600	134	14
	$\bar{\mu}$, мин	2,73	3,47	2,55	2,60	1,31
	\bar{k}	1,42	1,05	1,15	1,10	1,26
	$\alpha; \beta; s$, мин	0,50; 5,41; 0,00	0,92; 3,76; 0,0	0,75; 3,39; 0,0	0,82; 3,16; 0,0	недостаточно данных
	ρ^*	0,27	0,76	0,06	0,74	недостаточно данных
От оггона трапа до конца выпуска	n	452	75	383	113	5
	$\bar{\mu}$, мин	8,76	7,80	7,39	8,29	5,74
	\bar{k}	0,36	0,37	0,39	0,67	0,79
	$\alpha; \beta; s$, мин	5,00; 1,44; 1,64	7,49; 1,03; 0,0	3,59; 1,52; 2,00	1,18; 5,15; 2,25	недостаточно данных
	ρ^*	0,13	0,24	0,86	0,18	недостаточно данных

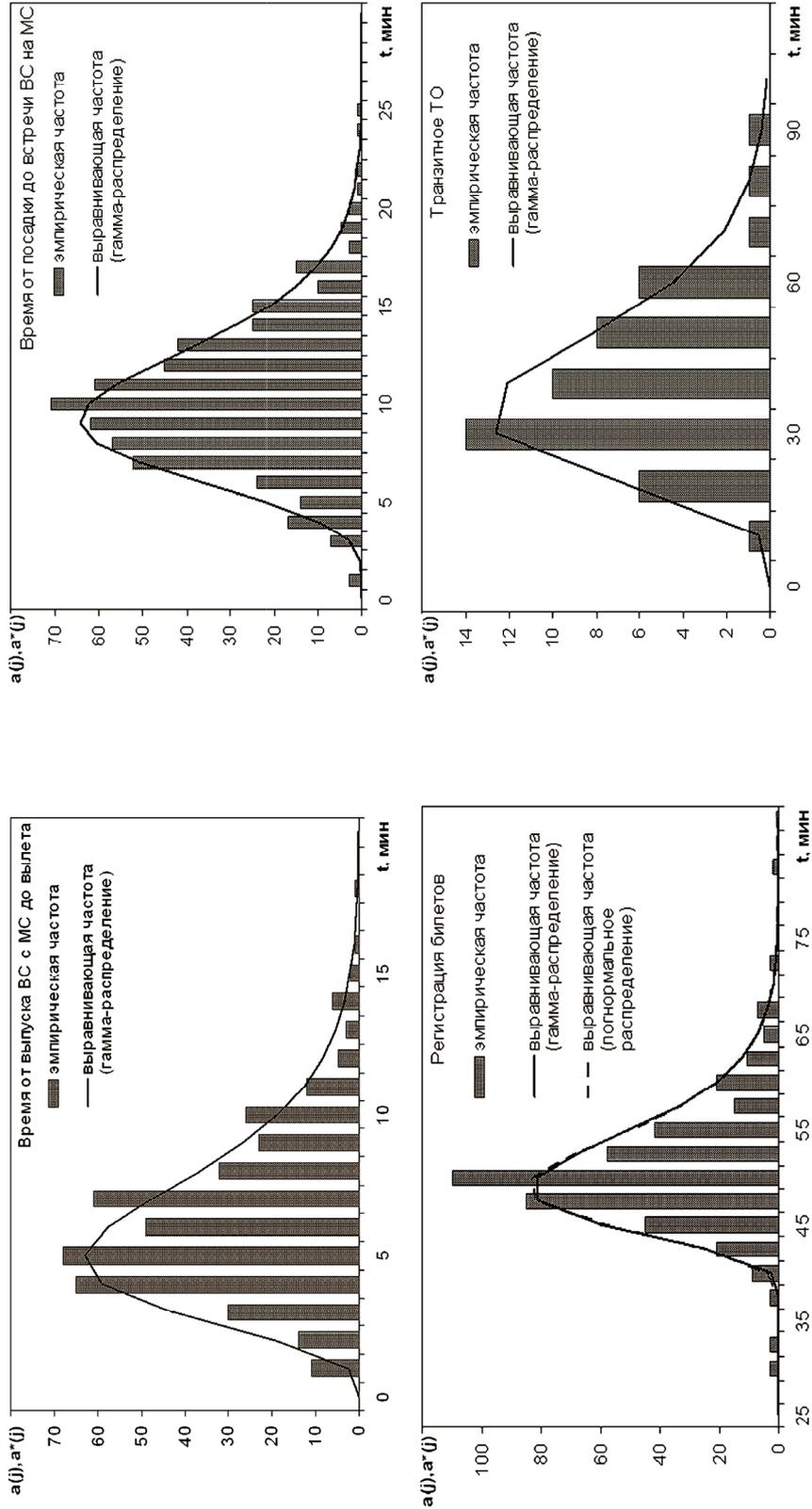


Рис. 2. Распределение продолжительности технологических операций (начало)

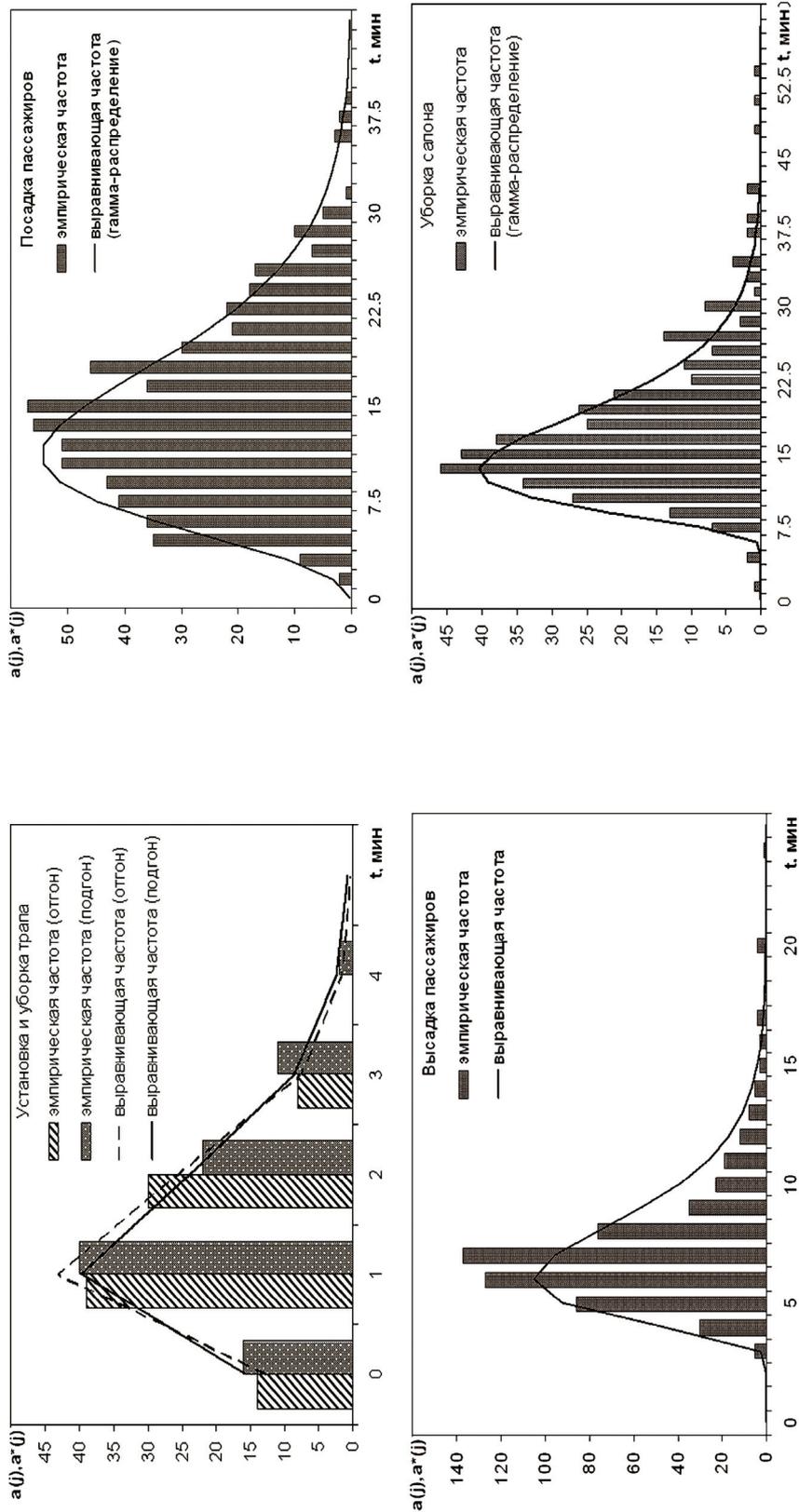


Рис. 2. Продолжение

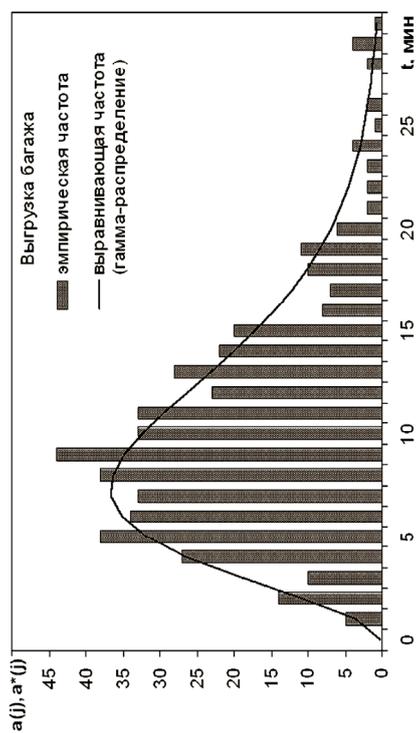
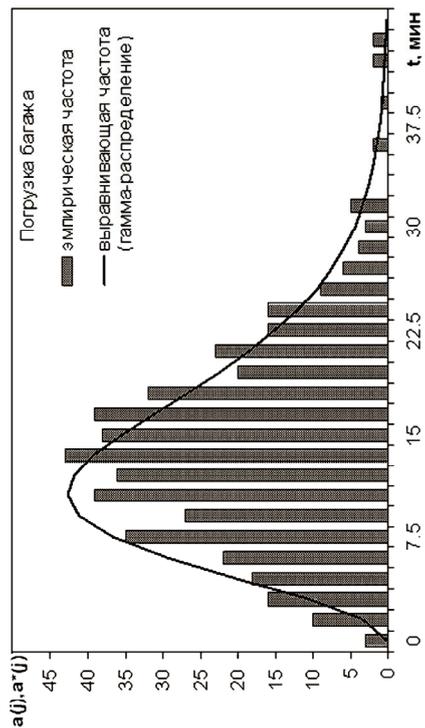


Рис. 2. Окончание

Здесь $S_{\bar{x}}$ – стандартная ошибка выборочного среднего; N – объем генеральной совокупности. Ошибка ни для одной из выборок не превысила вполне удовлетворительной величины – 4,5 %.

Анализ построенных по результатам обработки наблюдений гистограмм позволил выдвинуть гипотезу о принадлежности рассматриваемых случайных величин определенному теоретическому закону распределения. С использованием стандартного формализма критерия согласия χ^2 Пирсона, изложенного, например, в [4], была проведена проверка возможности сглаживания эмпирических распределений тремя наиболее простыми законами, отражающими особенности исследуемых процессов: логарифмически нормального, гамма-, а также Вейбулла.

Все три закона описываются тремя параметрами и характеризуются положительной асимметрией, что, судя по характеру гистограмм, делает правомерной гипотезу о возможности их использования. Перечисленные законы распределения обеспечили для различных выборок различное качество сглаживания, однако наиболее универсальным, обеспечивающим наивысший уровень значимости в большинстве случаев, оказалось гамма-распределение.

Формула плотности гамма-распределения вероятностей имеет вид [4]

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s, \\ \frac{\beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} (x-s)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-s)}{\beta}}, & x > s, \end{cases}$$

где α – параметр формы; β – масштабный параметр; s – параметр положения или сдвиг распределения.

С целью упрощения формируемой модели только гамма-закон используется для описания длительности всех операций. В тех случаях, когда ни один из перечисленных законов не обеспечивает удовлетворительного сглаживания, в табл. 1 приводятся параметры гамма-распределения, доставляющие минимум статистике критерия χ^2 Пирсона.

Наряду с продолжительностью рассмотрены такие важные характеристики технологических операций, перечисленных в табл. 1, как численность персонала и технических средств, требующиеся для их выполнения.

Регистрация билетов производится по порейсовой схеме, не требующей сортировки багажа, при которой число стоек, отводимое для обслуживания пассажиров рейса, колеблется от одной до трех, в зависимости от типа ВС, категорий рейса и перевозки, ожидающегося числа пассажиров и других факторов. Распределение числа стоек для ВС II категории приведено на рис. 3. Каждая стойка обслуживается двумя сотрудниками службы перевозок.

Посадка, высадка пассажиров включает также время доставки к самолету или от него. Доставка осуществляется перронными автобусами либо, реже, пешком. Пеший проход пассажиров к и от ВС категории III наблюдался в 25 % случаев, ВС категории II – в 10 % случаев. Пассажиры ВС категории I практически всегда доставлялись автобусами. Как правило, для доставки использовался один автобус. Иногда (примерно в 3 % случаев) привлекался второй автобус. Приблизительно такова же доля случаев, когда специализи-

рованный автобус использовался для доставки пассажиров повышенных классов обслуживания регулярных рейсов. Для посадки-высадки пассажиров в подавляющем большинстве случаев использовался единственный трап. Если ВС было оснащено бортовым трапом, то, как правило, использовался этот трап.

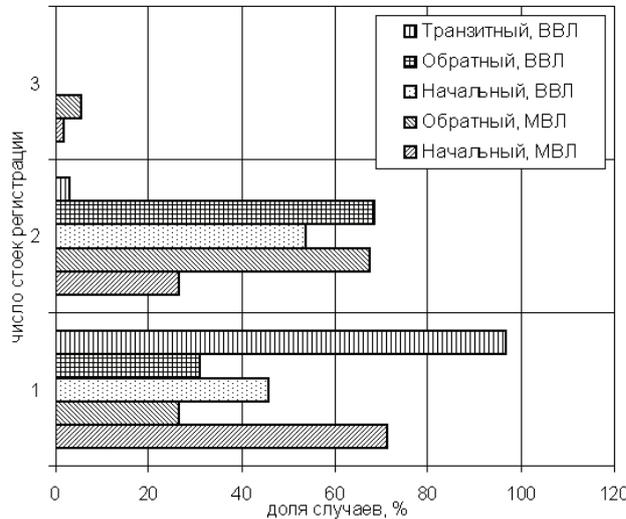


Рис. 3. Распределение числа стоек регистрации

Продолжительность погрузки и выгрузки багажа включает также затраты времени на его транспортировку по перрону, для чего используются автомобили с подъемным кузовом, электро- или автотележки. Ответственный за их выполнение персонал включает двух сотрудников аэропорта.

Уборка салона осуществляется бригадой уборщиков в составе от 1–2 человек (для Як-40, Ан-24) до 4–6 человек (для Ил-86, Ил-96) с использованием автобуса. Доля рейсов, при обслуживании которых уборка выполнялась, среди всех рейсов данной категории отражена в табл. 1 коэффициентом $K_{убор}$.

Для транзитного ТО выявляется зависимость продолжительности только от категории ВС, но не от категории перевозки. В условиях аэропорта N число исполнителей колеблется в пределах от 2–3 человек для ВС категории III до 4–6 человек – для ВС категории I. Работы по осмотру, проверке систем, приему и выпуску таких самолетов, как В-737, А-319, А-320, выполняются одним человеком.

Заправку ВС топливом от других операций отличает то обстоятельство, что ее продолжительность представляет собой случайную величину, которая складывается под воздействием наиболее многочисленного комплекса разнородных случайных факторов и способна изменяться в весьма широких пределах. Здесь длительность заправки T_3 определяется как композиция ряда случайных величин по формуле

$$T_3 = \frac{1}{N} \left(\frac{V}{G'} + \frac{V}{G''} \right) + E \left[\frac{V}{v_{T3} N} \right] T_{доп},$$

где V – объем заправляемого топлива, зависящий от категории ВС и расстояния перевозки; N – число одновременно используемых авиатопливозаправщиков (АТЗ); G' – производительность системы заправки ВС; G'' – производительность наполнения цистерны АТЗ на пункте налива; $v_{ТЗ}$ – вместимость цистерны АТЗ; $T_{доп}$ – время на подготовительно-заключительные операции у ВС и на пункте налива, а также на передвижение АТЗ по перрону; $E[\cdot]$ – оператор округления до ближайшего большего целого.

Из-за отсутствия данных в БД ИС некоторые из случайных величин, входящих в приведенную формулу, принимаются по другим источникам [5] и считаются равномерно распределенными. Характеристики ряда других случайных величин рассмотрены ниже.

Слабая разветвленность сети авиалиний аэропорта K облегчает учет объемов заправляемого топлива. Примеры результатов такого учета приведены на рис. 4,а, где отображены полигоны распределений массы заправляемого в ВС для выполнения рейса топлива, отнесенной к массе максимального его запаса. Рассмотрены заправки двух определенных самолетов, выполняющих рейсы на двух авиалиниях, а именно: Ту-154 Б-2 – на линии протяженностью 1900 км, Ту-134 Б – протяженностью 2400 км.

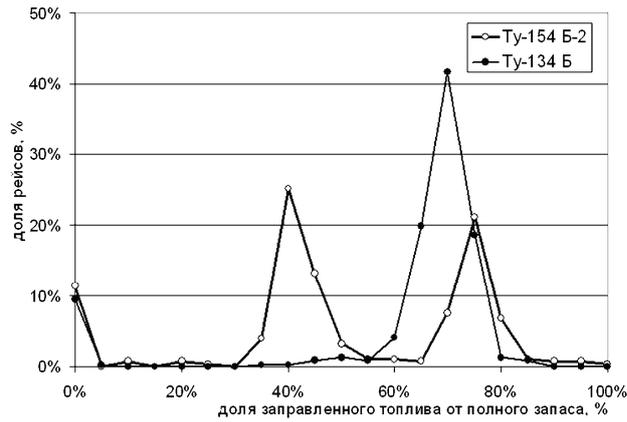
В целом данные ИС свидетельствуют о значительном разбросе количества заправляемого топлива, причем примерно в 10 % всех случаев ВС в аэропорту вылета не заправлялось, для полета использовался имеющийся запас топлива.

В аэропорту K , не отличающемся высокой интенсивностью движения, заправка выполняется одним АТЗ, совершающим в случае необходимости несколько подъездов к заправляемому ВС. Для заправки самолетов, относящихся к I и II категориям, используются АТЗ типа АТЗ-22, для ВС меньших категорий – АТЗ-10.5. Время на подъезд и отъезд АТЗ составляет 3–5 мин.

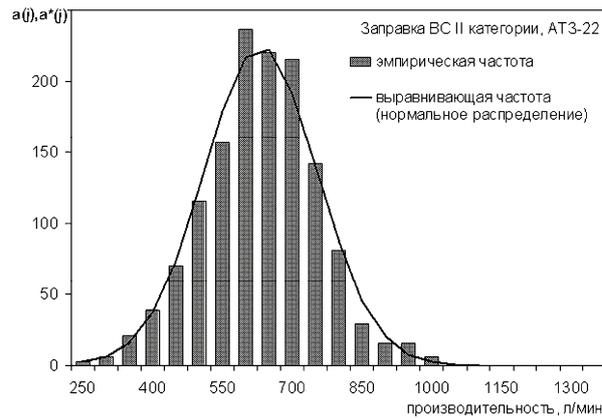
Анализ статистических данных позволил рассматривать производительность заправки как нормально распределенную случайную величину, зависящую от категории ВС и типа АТЗ. Результаты проверки статистической гипотезы, приведены в табл. 2, где μ – математическое ожидание сглаживающего нормального распределения, k – его коэффициент вариации. Гистограмма эмпирических значений и график сглаживающего нормального распределения для производительности заправки ВС II категории приведены в качестве иллюстрации на рис. 4,б.

Таблица 2
Характеристики распределения продолжительности заправки ВС топливом

Параметры распределений	Категория ВС, тип используемого топливозаправщика			
	I, АТЗ-22	II, АТЗ-22	III, АТЗ-22	III, АТЗ-10.5
n	1731	1373	246	257
$\bar{\mu}$, л/мин	930,45	657,52	497,88	310,03
\bar{k}	0,25	0,18	0,29	0,32
μ , л/мин	927,86	656,87	498,58	310,99
k	0,25	0,18	0,29	0,33
ρ^*	0,06	0,13	0,01	0,01



а)



б)

Рис. 4. Статистические распределения характеристик операции заправки ВС топливом

Приведенные выше характеристики технологических операций, полученные на основе обработки статистических данных, в целом совпадают с аналогами, приводимыми в нормативной и специальной литературе, что служит определенной гарантией адекватности сформированной модели. Статистическая модель программно реализована на базе системы имитационного моделирования GPSS World.

4. Результаты моделирования

Описанная выше имитационная модель использована при решении широкого спектра задач, связанных с анализом и оптимизацией технологических и технико-экономических параметров системы обслуживания перевозок аэропортов. Ниже в качестве иллюстрации приведены некоторые результаты оптимизации численности технических средств и персонала аэропорта N . Определена минимальная численность, обеспечивающая выполнение заданных ограничений по качеству обслуживания ВС и пассажиров. В роли упомянутых ограничений выступает длительность ожидания обслуживания, которая с надежностью 0,95 не должна превысить заданную величину $t_{ож}$. Моделирование проводилось для пиковых уровней интенсивности потока ВС,

как наблюдавшихся в аэропорту N в течение последних лет, так и прогнозных. Входящие потоки ВС и пассажиров в рассмотренном примере считались стационарными пуассоновскими. Распределение ВС по категориям производилось в соответствии со статистикой, содержащейся в БД ИС рассматриваемого аэропорта.

Результаты решения оптимизационной задачи для двух выбранных значений $t_{ож}$ сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты оптимизации

Интенсивность потока, ВС/ч	2		3		4		5		6		7	
	(факт)		(прогноз)									
$t_{ож}$, мин	10	2	10	2	10	2	10	2	10	2	10	2
Минимальная численность обслуживающих средств и персонала												
Транспортеры багажа	8	8	8	8	8	9	9	10	10	11	11	11
Трапы	12	12	14	14	16	17	18	19	20	21	22	23
АТЗ	5	5	6	7	7	8	8	8	8	9	9	10
Багажные карусели	5	5	5	6	6	6	6	7	7	8	8	8
Стойки регистрации	11	11	12	13	15	15	16	17	18	19	20	21
Бригады ТО	7	7	8	9	10	10	11	11	11	12	13	13
Бригады уборщиков	5	6	6	7	7	8	8	8	8	9	9	10

Результаты оптимизации численности средств обслуживания перевозок явились базой для оценки уровня инвестиций в развитие аэропорта.

Таким образом, имитационная модель технологических процессов обслуживания перевозок является эффективным инструментом комплексной оптимизации, анализа и прогнозирования параметров производственных комплексов аэропорта как сложной стохастической системы.

Список литературы

1. **Кельтон, В.** Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб. : Питер, 2004. – 847 с.
2. **Далецкий, С. В.** Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации / С. В. Далецкий, О. Я. Деркач, А. Н. Петров. – М. : Воздушный транспорт, 2002. – 216 с.
3. **Шварц, Г.** Выборочный метод / Г. Шварц. – М. : Статистика, 1978. – 213 с.
4. **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
5. **Канарчук, В. Е.** Авиационная наземная техника : справочник / В. Е. Канарчук и др. – М. : Транспорт, 1989. – 278 с.

Романенко Владимир Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, кафедра организации и управления перевозками на транспорте, Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева

E-mail: vla_rom@mail.ru

Romanenko Vladimir Alekseevich

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of transport conveyance organization and management, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov

УДК 656.7.072/.073

Романенко, В. А.

Имитационная модель технологических процессов наземного обслуживания перевозок в аэропорту / В. А. Романенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 79–95.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ В ДВУХПОЗИЦИОННЫХ ОХРАННЫХ СИСТЕМАХ БЛИЖНЕЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Аннотация. Рассмотрена возможность определения размера нарушителя и скорости его движения в охраняемой зоне радиолокационной технической системы охраны путем восстановления функции пропускания по дифракционной картине нарушителя. Получены алгоритмы определения размера нарушителя в аддитивной смеси сигнала с шумом, а также их варианты для случая определения размера нарушителя по смещенным реализациям выходного сигнала приемника.

Ключевые слова: радиолокационная система, техническая система охраны, дифракционная картина, интеграл Френеля – Кирхгофа.

Abstract. The authors consider the possibility of defining the trespasser's size and rate of motion in the protected zone of a radar technical protection system by restoring the transmission function according to the trespasser's diffraction pattern. The authors have obtained algorithms of defining the trespasser's size in the additive signal-noise mixture, as well as their variants for the case of defining the trespasser's size according to the displaced realizations of the receiver's output signal.

Key words: radar system, technical protection system, diffraction pattern, Fresnel – Kirchhoff integral.

Введение

При увеличении длины периметра охраняемой зоны (ОЗ) радиолокационной технической системы охраны (РЛТСО) возрастают затраты на идентификацию вида нарушителя (Н) охраной объекта. Снижение количества ложных тревог из-за объектов, не представляющих угрозы для ОЗ, возможно при использовании аппаратуры, определяющей часть геометрических размеров и скорость движения Н. В работе рассмотрено решение этой проблемы путем восстановления вида функции пропускания $\beta_{\text{пр}}(x, y)$ трехмерного непрозрачного для электромагнитной волны (ЭМ-волны) Н по его дифракционной картине.

1. Восстановление функции пропускания нарушителя по его дифракционной картине

На рис. 1 приведена схема пересечения ОЗ двухпозиционной РЛТСО [1] нарушителем, моделируемым в виде эллиптического цилиндра. Нарушитель перемещается в ОЗ по направлению OX , при этом координаты его центра и размеры по осям OX , OY и OZ равны соответственно x_0 , y_0 , R_H и $2a$, $2b$ и $2c$; R_H – дальность до нарушителя. Векторы \vec{r} и \vec{s} проведены из точек P_0 и P расположения антенн передатчика (ПРД) и приемника (ПРМ) РЛТСО в произвольную точку поверхности Q нарушителя, через которую проходит и вектор нормали \vec{n} .

Для определения геометрических размеров Н используем зависимость комплексной амплитуды ЭМ-волны $\dot{E}(P)$ в точке P от координаты x_0 . При

определении $\dot{E}(P)$ воспользуемся дифракционной формулой Френеля – Кирхгофа [2]:

$$\dot{E}(P) = -\frac{jA}{2\lambda} \iint_L \frac{\beta_{\text{пр}}(x, y) \exp[jk(r+s)]}{r \cdot s} [\cos(\vec{n}, \vec{r}) - \cos(\vec{n}, \vec{s})] d\gamma, \quad (1)$$

где r, s – модули векторов \vec{r} и \vec{s} ; $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина ЭМ-волны; L – контур интегрирования, проходящий через точку Q ; γ – элемент контура интегрирования.

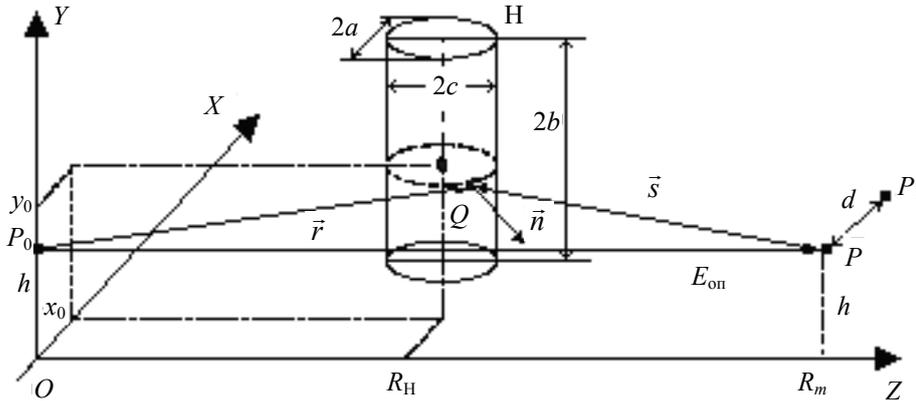


Рис. 1. Схема пересечения нарушителем охраняемой зоны

Разложение в (1) r и s в ряд в окрестности x_0, y_0 с последующим отбрасыванием членов, начиная с квадратичного, приводит к дифракции Фраунгофера, а начиная с кубического – к дифракции Френеля [2]. Для этих типов дифракции восстановление функции пропускания $\beta_{\text{пр}}(x, y)$ возможно при использовании обратных преобразований Фурье и Френеля соответственно. Наряду с этим обратные преобразования Фурье и Френеля являются упрощениями некоторого общего преобразования, так же как дифракционные интегралы Фраунгофера и Френеля являются частными случаями выражения (1). Для определения его одномерного вида используем случай дифракции ЭМ-волн на щели в плоском экране с шириной $2a$ по оси X от протяженного источника. Для него выражение (1) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \dot{E}(P) &= -\frac{jA}{2\lambda} \int_{-a}^a \frac{\exp[jk(r(x_0) + s(x_0))]}{r(x_0)s(x_0)} \left[\frac{R_H}{r(x_0)} - \frac{R_H - R_m}{s(x_0)} \right] dx = \\ &= -\frac{jA}{2\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \beta_{\text{пр}}(x) \frac{\exp[jk(r(x_0) + s(x_0))]}{r(x_0)s(x_0)} \left[\frac{R_H}{r(x_0)} - \frac{R_H - R_m}{s(x_0)} \right] dx, \quad (2) \end{aligned}$$

где $r(x_0) = \sqrt{(x+x_0)^2 + R_H^2}$, $s(x_0) = \sqrt{(x+x_0)^2 + (R_m - R_H)^2}$.

По аналогии с обратными преобразованиями Фурье и Френеля выражение, восстанавливающее вид функции пропускания H , можно получить заме-

ной в (2) $\beta_{\text{пр}}(x)$ на $\dot{E}(P)$ и показателя степени в экспоненте на комплексно-сопряженный:

$$\beta_{\text{пр}}(x) \approx \frac{1}{2\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{E}(P) \frac{\exp[-jk(r(x_0) + s(x_0))]}{r(x_0) \cdot s(x_0)} \left[\frac{R_H}{r(x_0)} - \frac{R_H - R_m}{s(x_0)} \right] dx_0. \quad (3)$$

Полученное выражение (3) обеспечивает восстановление вида функции пропускания одномерных объектов по направлению оси OX при меньших ограничениях на размеры и расстояние от H до точки наблюдения по сравнению с преобразованиями Фурье и Френеля. На рис. 2,а приведены результаты расчета значений $|\dot{E}(P)|$ при размерах двух полуосей эллипса (рис. 1) $a = 0,2$ м, $c = 0,3$ м и половиной высоты цилиндра $b = 0,8$ м, а на рис. 2,б – результаты восстановления функции $\beta_{\text{пр}}(x)$ в соответствии с выражением (3) при $R_m = 150$ м; $\lambda = 0,016$ м, $A = 1$ В для высоты размещения антенн ПРД и ПРМ над поверхностью земли $h = y_0$ и равной 1 м.

В соответствии с рис. 2,б размер H L_H по направлению X равен $2a \approx 0,4$ м. Отметим, что значительные изменения высоты цилиндра b и координаты y_0 не приводят к заметному изменению фиксируемого размера $2a$ H , хотя при этом наблюдаются существенные изменения $|\dot{E}(P)|$.

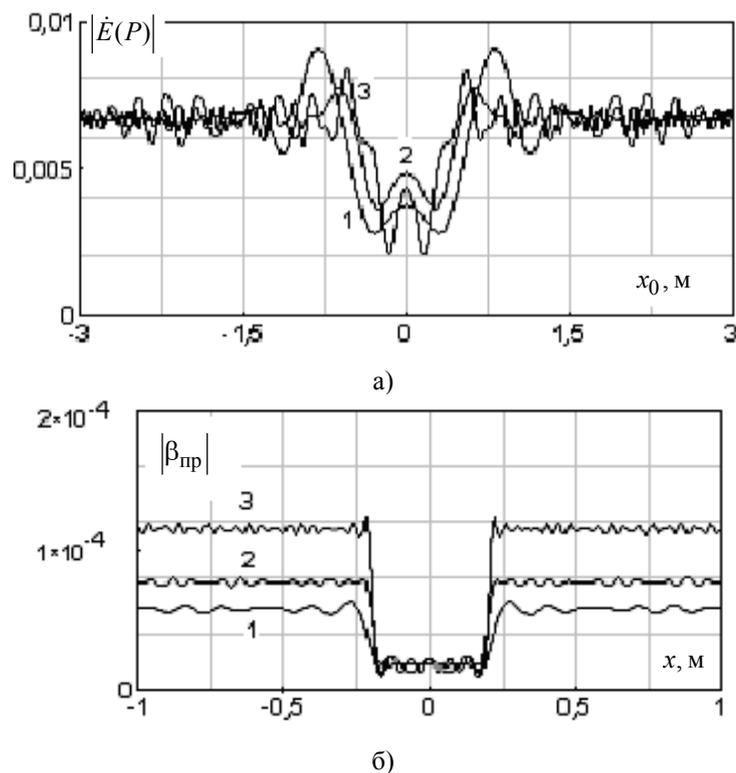


Рис. 2. Результат дифракции (а) и восстановления функции пропускания (б) при различных значениях R_H : 1 – 75 м, 2 – 125 м, 3 – 140 м

Приведенные результаты определения размера H в направлении перемещения (перпендикулярно оси OZ) показывают работоспособность предложенного в работе подхода и позволяют распространить его на случаи двумерной и трехмерной модели H .

2. Влияние шума на определение размера нарушителя

Шум на выходе ПРМ двухпозиционных РЛТСО обусловлен взаимодействием ЭМ-волн с почвой, растительными и снежными покровами, атмосферой и т.д. Это приводит к маскировке сигналов и увеличению погрешности определения размера нарушителя из-за искажения картины дифракции поля и результирующего сигнала ПРМ. На рис. 3 приведены результаты моделирования в программной среде MathCad воздействия шума на восстановленную функцию пропускания $\beta_{\text{пр}}(x)$ при различных отношениях мощности сигнала

к мощности шума $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$.

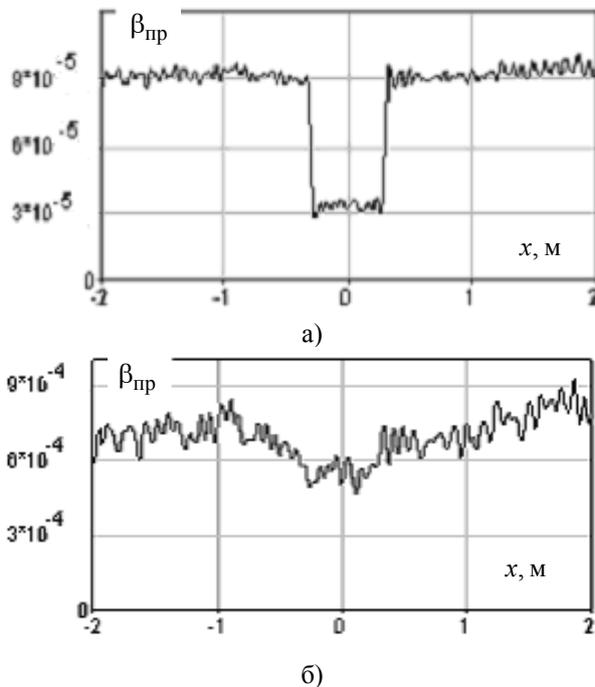


Рис. 3. Результат восстановления функции пропускания при $a = 0,3$ м для различных отношений сигнал-шум: а – $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 73,4$;
б – $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = 0,734$ или по напряженности 8,56 и 0,856 соответственно

По графику зависимости $\beta_{\text{пр}}(x)$, приведенному на рис. 3,а, можно определить, что $L_H \approx 0,6$ м. Однако при более сложном виде функции пропускания, обусловленном увеличением уровня шума (рис. 3,б), определение размера H становится невозможным.

Анализ реализаций случайного процесса на выходе реального ПРМ (при отсутствии Н в ОЗ) позволяет сделать вывод о преобладании низкочастотных (НЧ) составляющих в его спектре. Корреляционная функция НЧ-составляющей $B_{НЧ}(\tau)$, рассчитанная по отсчетам реализации случайного процесса, удовлетворительно соответствует корреляционной функции стационарного марковского процесса [3]:

$$B_{НЧ}(\tau) = \sigma^2 \exp(-\mu|\tau|), \quad (4)$$

где τ – интервал времени.

Аппроксимация реальной зависимости по методу наименьших квадратов дала следующий диапазон значений μ : $1,7 \leq \mu \leq 2,0$ 1/с.

Кроме НЧ-компоненты, в выходном сигнале ПРМ присутствуют и высокочастотные (ВЧ) составляющие, ответственные за короткие флуктуации малой амплитуды. Для упрощения модели шума эти составляющие учитывались как белый шум, корреляционная функция которого равна [3]:

$$B_{ВЧ}(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau), \quad (5)$$

где N_0 – спектральная плотность мощности.

Расчет значения случайной составляющей погрешности Δ_x определения размера Н на уровне 0,5 от установившегося значения, обусловленной НЧ-составляющей шума, дал значение $\Delta_x = \pm 0,0219$, что соответствует относительной погрешности $\delta_x = \pm 3,65\%$ при доверительной вероятности $P = 0,997$ для дисперсии шума $\sigma^2 = 1,514 \cdot 10^{-7}$ В².

3. Использование оптимального приема для определения размеров нарушителя

Ввиду того, что зависимость функции пропускания $\beta_{пр}(x)$ априорно известна (прямоугольный или трапецеидальный импульс), то появляется возможность использования оптимальных методов приема. Длительность L_H импульса $\beta_{пр}(x)$ может принимать значения из диапазона $L_{Hmin} \leq L_H \leq L_{Hmax}$, где L_{Hmin} и L_{Hmax} – минимальный и максимальный размеры Н соответственно в направлении его перемещения, поэтому задача определения размера Н трансформируется в задачу различения сигналов [3], сводящуюся к определению максимума функции $f(L_{H,k})$ от k -реализации:

$$f(L_{H,k}) = \int_{-x_{max}}^{x_{max}} s_k(x, L_{H,k}) \beta_{пр}(x) dx. \quad (6)$$

Вид зависимости $s_k(x, L_{H,k})$, входящей в (6), приведен на рис. 4,а, а зависимость $f(L_{H,k})$ от параметра $L_{H,k}$ приведена на рис. 5,а.

Оценка (6) эффективна только для аддитивной смеси сигнала с белым шумом, и неэффективна для смеси его с НЧ-шумом. Тем не менее ее исполь-

зование позволяет достичь более чем восьмикратного выигрыша в погрешности, обусловленной НЧ-составляющей шума, по сравнению с оценкой $\hat{L}_{H,k}$ по уровню 0,5 от установившегося значения.

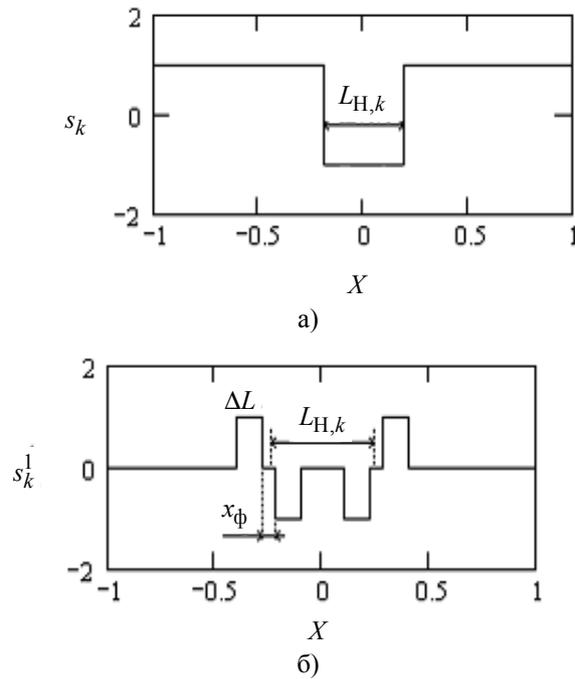


Рис. 4. Вид зависимостей: а – $s_k(x, L_{H,k})$; б – $s_k^1(x, L_{H,k})$

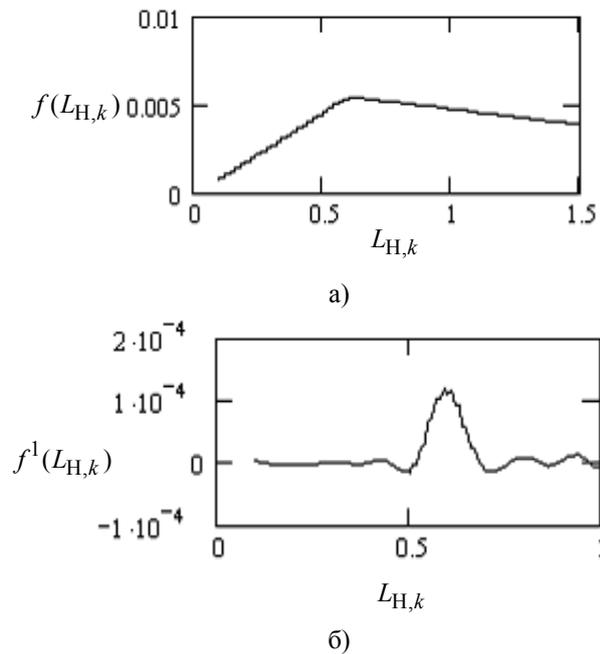


Рис. 5. Графики зависимостей $f(L_{H,k})$ (а) и $f^1(L_{H,k})$ (б) от параметра $L_{H,k}$

Нахождение аналога выражения (6), эффективного для смеси ВЧ- и НЧ-шумов, является сложной задачей. Вместе с этим корреляционная зависимость соседних отсчетов реализаций стационарного марковского процесса при малых значениях τ позволяет считать, что использование разности отсчетов функции пропускания при значениях x , примыкающих к фронтам $\beta_{\text{пр}}(x)$, обеспечит значительное подавление влияния НЧ-шума на результат определения размера N . По отношению к белому шуму эти же отсчеты будут независимыми, вследствие чего использование разности отсчетов $\beta_{\text{пр}}(x)$ не уменьшит влияние этой составляющей на измерение L_N . Компромиссный вид $s_k(x, L_{N,k})$, обеспечивающий снижение воздействия НЧ и ВЧ компонент шума, может представлять зависимость $s_k^1(x, L_{N,k})$, график которой изображен на рис. 4,б.

Конечная протяженность участков ΔL зависимости $s_k^1(x, L_{N,k})$, на которых она отлична от нуля, обеспечивает уменьшение влияния ВЧ-составляющей шума. Варьирование параметров x_0 и ΔL сигнала $s_k^1(x, L_{N,k})$ позволяет подстроить преобразование (6) под конкретный вид функции пропускания и соотношение ВЧ и НЧ-шумов.

График $f^1(L_{N,k})$ преобразования (6) при подстановке в него вместо s_k зависимости s_k^1 при различных отношениях сигнал/шум приведен на рис. 5,б. Очевидно, что максимум функции $f^1(L_{N,k})$, соответствующий равенству $L_{N,k} = L_N$, выражен более явно, нежели максимум $f(L_{N,k})$. Кроме этого, увеличение уровня шума в меньшей степени влияет на появление дополнительных локальных экстремумов функции $f^1(L_{N,k})$, соизмеримых по уровню с основным и приводящим к неоднозначности определения L_N .

Расчет значений случайной составляющей погрешности, обусловленной воздействием НЧ-шума, при использовании функционала $f^1(L_{N,k})$ дает более чем пятидесятикратный выигрыш по сравнению с оценкой $\hat{L}_{N,k}$ по уровню 0,5, однако при этом увеличивается вклад от ВЧ-составляющей шума.

4. Определение расстояния до нарушителя и его скорости

Определение значения координаты R_N по оси OZ , необходимого при использовании преобразования (3), может быть произведено при соответствующей организации периметра охраняемой зоны РЛТСО. При этом возможно и определение скорости $V_{N\perp}$ нарушителя в направлении, перпендикулярном оси OZ . Менее затратный в аппаратном плане вариант возможен при варьировании параметра R_N в преобразовании (3) с последующим применением преобразования $f^1(L_{N,k})$ по критерию максимума его максимального значения. В этом случае координата R_N будет равна значению параметра R_N в преобразовании (3), обеспечивающему максимум максимального значения

$f^1(L_{H,k})$. Такой способ определения значения координаты R_H предъявляет повышенные требования к производительности вычислений.

Реальный выходной сигнал ПРМ является функцией времени t , а не координаты центра x_0H , и при отсутствии сведений о скорости его движения можно определить только длительность импульса функции пропускания $\beta_{пр}(t)$ во времени, а не размер H . Для определения скорости движения H можно использовать два приемника в каждом звене РЛТСО, при этом дополнительный приемник ПРМ1 необходимо разместить в точке P_1 (рис. 1) на расстоянии d от ПРМ по оси OX . При перемещении нарушителя со скоростью $V_{H\perp}$ на выходах ПРМ и ПРМ1 формируются два близких по форме сигнала, сдвинутых на время Δt . Исходя из геометрии прямоугольного треугольника, образованного точками P_0 , P_1 и P_2 , нетрудно убедиться, что при $d \ll R_m$

$$V_{H\perp} = \frac{d}{R_m} \frac{R_H}{\Delta t}. \quad (7)$$

5. Особенности восстановления вида функции пропускания по участку реализации выходного сигнала ПРМ

Ввиду неопределенности момента появления H в ОЗ РЛТСО регистрация самого этого факта и определение размера H может быть произведена путем циклического осуществления преобразования (3) над реализацией выходного сигнала ПРМ. После обработки выбранного участка реализации конечной продолжительности необходимо осуществить сдвиг начала преобразования на величину t_c (или $\Delta x = V_{H\perp} \times t_c$) и перейти к обработке следующего участка и т.д. Восстановление функции пропускания по смещенной на t_c или Δx реализации комплексной амплитуды конечной ($2x_{\max}$) продолжительности приводит к сдвигу функции пропускания на такую же величину и несимметрии ее относительно точки $x = 0$, что требует пересмотра вида преобразования (6) и весовой функции $s_k^1(x, L_{H,k})$.

Анализ вида $s_k^1(x, L_{H,k})$ показывает, что ее отличные от нуля области (рис. 4,б), симметричные относительно точки $x = 0$, обеспечивают выделение участков изменения $\beta_{пр}(x)$, при этом правая часть графика $s_k^1(x, L_{H,k})$ обеспечивает регистрацию нарастающего, а левая – спадающего фронта функции пропускания. Если оставить только правую часть $s_k^1(x, L_{H,k})$, то получим сигнал $s_k(x, L_k)$, график которого приведен на рис. 6.

Параметр L_k обозначает удаление средней точки графика между участками сигнала $s_k(x, L_k)$, равными ± 1 , от начала координат $x = 0$, при этом он может принимать как положительные, так и отрицательные значения. В соответствии с изменением весовой функции $s_k^1(x, L_{H,k})$ изменим и преобразование (6):

$$f^2(L_k) = \int_{-L_{\max}}^{L_{\max}} s_k(x, L_k) \beta_{\text{пр}}(x) dx. \quad (8)$$

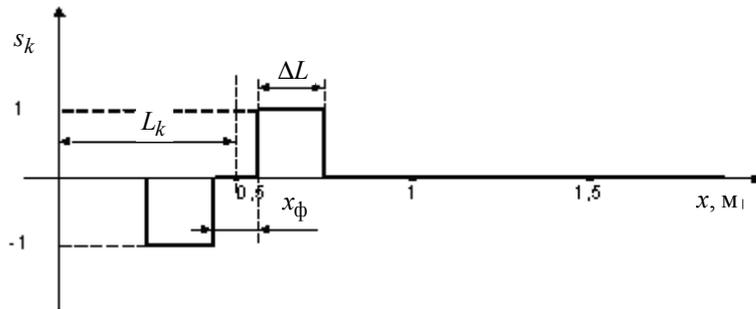


Рис. 6. График зависимости сигнала $s_k(x, L_k)$

Преобразование (8) не связано условием симметрии функции пропускания $\beta_{\text{пр}}(x)$ относительно значения $x = 0$. При попадании нарастающего фронта в зону отличного от нуля участка сигнала $s_k^2(x, L_k)$ значение $f^2(L_k)$ будет больше нуля, а при попадании спадающего фронта в ту же зону – меньше нуля, поэтому размер N должен определяться как разность тех двух значений L_k (L_k^{\max} и L_k^{\min}), при которых функция $f^2(L_k)$ принимает соответственно максимальное и минимальные значения:

$$L_{N,k} = L_k^{\max} - L_k^{\min}. \quad (9)$$

Однократное применение преобразования (9) при восстановлении функции пропускания по одному участку реализации выходного сигнала ПРМ не может привести к получению размера N . Из-за случайного характера выходного сигнала ПРМ его использование при отсутствии N в ОЗ будет сопровождаться получением минимального и максимального значений $f^2(L_k)$, а следовательно, и получением последовательности некоторых значений L_N^i , которые не будут иметь отношения к размеру N L_N и носить случайный характер. При появлении же импульса функции пропускания N (рис. 3,а) в пределах интервала интегрирования преобразования (9) результатом преобразования будет получение действительного размера N – L_{N1} . После обработки следующего участка реализации выходного сигнала ПРМ, сдвинутого на значение Δx относительно предыдущего, будет получено второе значение размера N – L_{N2} . Сравнение двух полученных значений даст различие в пределах погрешности измерения размера N , поэтому оба этих значения могут быть зафиксированы. Данная последовательность действий по определению размера N должна повторяться до сдвига спадающего фронта $\beta_{\text{пр}}(x)$ на расстояние не более, чем на минус L_{\max} (точнее – не более, чем на $(-L_{\max} + x_{\text{ф}} / 2 + \Delta L)$) от точки $x = 0$. После выхода спадающего фронта

$\beta_{\text{пр}}(x)$ Н за пределы интервала интегрирования в преобразовании (9) получа-
емые размеры $L_{H,k}$ снова будут носить случайный характер. Очевидно, что
размер Н целесообразно определять как среднее значение зафиксированных
результатов по формуле

$$L_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Hi}, \quad (10)$$

где n – количество зафиксированных результатов.

Заключение

Предложенные методы обработки сигналов ПРМ двухпозиционных
РЛТСО при установке дополнительного приемника позволяют определить
размер и скорость движения Н в направлении, перпендикулярном оси ОЗ.
При использовании одного ПРМ они обеспечивают значительное подавление
влияния помех и повышение вероятности правильного обнаружения Н.

Список литературы

1. **Оленин, Ю. А.** Двухпозиционные радиолокационные системы обнаружения ближнего действия: основы электродинамики формирования информационных признаков сигнала / Ю. А. Оленин // Проблемы объектовой охраны : сборник научных трудов. – Пенза : Информационно-издательский центр ПензГУ, 2001. – Вып. 2. – 176 с.
2. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1973. – 720 с.
3. **Левин, Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин. – М. : Сов. радио, 1975. – 391 с.

Сальников Игорь Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой вычислительных
машин и систем, Пензенская
государственная технологическая
академия

E-mail: iis@pgta.ru

Salnikov Igor Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department computers
and computing systems, Penza State
Technological Academy

Чернышев Максим Николаевич

аспирант, Пензенская государственная
технологическая академия

E-mail: iis@pgta.ru

Chernyshyov Maxim Nikolaevich

Postgraduate student,
Penza State Technological Academy

УДК 621.396.96

Сальников, И. И.

Определение размера и скорости движения нарушителя в двухпозиционных охранных системах ближней радиолокации / И. И. Сальников, М. Н. Чернышев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 96–105.

А. Г. Финогеев, В. А. Маслов, А. А. Финогеев

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИОННЫМ РЕСУРСАМ

Аннотация. Описывается создание экспериментальной информационной среды кафедры университета для поддержки мониторинга различных систем и служб, а также информационной поддержки студентов и преподавателей. Рассматриваются вопросы организации «повсеместного» доступа на базе гетерогенных беспроводных сетей, а также идентификации, локализации и позиционирования пользователей системы. Приводятся описание построенной информационной среды и достигнутые результаты.

Ключевые слова: гетерогенные сети, локализация, информационная поддержка, сенсорные сети, дополненная реальность, поддержка принятия решений, электронное образование, WiFi, Bluetooth, ZigBee.

Abstract. The article describes a development of experimental information environment of a University sub-department, intended for maintenance of various systems and services monitoring as well as for students and teachers information support. The authors consider the questions of "ubiquitous" access organization on the basis of heterogeneous wireless networks, identification, location and positioning of system users.

Key words: heterogeneous networks, localization, information support, sensor networks, augmented reality, decision support, e-education, WiFi, Bluetooth, ZigBee.

Введение

В настоящее время в связи со значительным прогрессом в развитии современных информационных и телекоммуникационных технологий образовательные учреждения различного профиля все большее внимание уделяют вопросам разработки и эффективного применения инновационных методик и технологий в процессе подготовки специалистов. При этом особую актуальность приобретают задачи, связанные с внедрением беспроводных информационно-телекоммуникационных технологий в вузе. В связи с появлением и развитием технологий электронного (e-learning) и мобильного (m-learning) образования возникает необходимость разработки систем произвольного персонального доступа как к внутренним информационно-образовательным ресурсам вуза, так и к внешним интернет-ресурсам для поддержки различных форм очного и дистанционного обучения, самообразования студентов.

Для построения полнофункционального портала на основе гетерогенной телекоммуникационной среды, помимо традиционных методов, предлагается внедрить принцип «повсеместного» (ubiquitous) доступа к информационным ресурсам с поддержкой мобильности пользователей (технология u-learning). Концептуальное значение «повсеместная сеть» не ограничивается только географической характеристикой. Фактически это создание всеохватывающей (всепроникающей) телекоммуникационной сети, которая вместе с программным обеспечением позволяет реализовать концепцию получения информации по принципу 4A («anywhere, anytime, by anyone and anything»). Подобный принцип предполагает широкое использование технологий беспроводной и мобильной связи (Bluetooth, WI-FI, WI-MAX, GPRS, EDGE, UMTS, WAP) [1].

Таким образом, возникает необходимость разработки широкомасштабных корпоративных информационных систем с возможностью беспроводного мобильного доступа пользователей к различным сервисам и ресурсам [2]. Причем подобная система должна быть настроена не только на доставку информации до пользователя, но и предоставлять ему возможность обратной связи с информационной системой, web-презентациями, виртуальными обучающими комплексами.

К основным сервисам подобной информационной системы с беспроводным доступом можно отнести следующие:

1. Сервис локализации и определения местоположения. Предназначен для автоматического обнаружения, распознавания и идентификации мобильного устройства при его попадании в зоны доступа информационного пространства.

2. Сервис персональной информационной поддержки. Позволяет пользователю получать по запросу необходимую ему информацию.

3. Сервис сбора телеметрической и биометрической информации. Предназначен для мониторинга работы различных технических, энергетических, биологических и прочих систем в различных университетских службах.

4. Сервис дистанционного управления. Предназначен для использования мобильных устройств с радиомодулями для управления приборами, объектами виртуальной и расширенной реальности [3], оргтехникой и т.д.

1. Архитектура информационной сети с поддержкой беспроводного доступа

Для реализации проекта предложена базовая архитектура гетерогенной сети с объединением сетей трех беспроводных технологий и проводного сетевого сегмента Ethernet со шлюзами во внешнюю сеть Интернет.

В общем случае сетевая архитектура включает следующие кластерные сегменты:

- 1) кластеры сенсорных узлов ZigBee;
- 2) распределенную структуру (scatter net) пикосетей устройств связи с радиомодулями Bluetooth;
- 3) зоны доступа WiFi с расширенным набором базовых служб (ESS-topology);
- 4) совокупность устройств, используемых для беспроводного доступа к ресурсам гетерогенной сети;
- 5) совокупность интерфейсных устройств (маршрутизаторов, координаторов и т.д.), выполняющих функции шлюзования для объединения сегментов и выхода во внешнюю сеть.

Для объединения устройств внутри кластера используются координаторы, точки доступа, мастер-узлы, маршрутизаторы и коммутаторы. Для объединения кластеров разных технологий используются устройства-шлюзы (мосты) с несколькими беспроводными модулями и программным обеспечением для протокольного преобразования.

Создаваемая архитектура экспериментальной гетерогенной сети позволит реализовать принцип «бесшовной» передачи информации между сетевыми сегментами с разными протокольными стеками.

Для исследования архитектуры можно использовать многоагентную распределенную модель «пиринговой» сети с равноправными узлами (Multia-

gent Peer-to-Peer Distributed Model). В соответствии с системно-синергетической концепцией любая сложная информационная система обладает способностью к самоорганизации [4]. Это свойство лежит и в основе организации ячеистых самоорганизующихся сетей [5] с децентрализованной моделью управления и поддержкой беспроводных технологий передачи данных и их применения для мониторинга, управления и поддержки принятия решений в технических и социально-экономических системах.

Подобная модель имеет следующие преимущества:

- 1) открытая сетевая инфраструктура (любой узел может стать участником взаимодействия);
- 2) полностью автономная самоорганизация логической сети либо самоорганизация кластеров с координирующими узлами;
- 3) высокая отказоустойчивость системы даже при сбоях у большинства ее узлов.

2. Идентификация и локализация в информационном пространстве

При организации «повсеместного» доступа к информационным ресурсам университета первоочередной задачей является идентификация и аутентификация пользователей, а также локализация (определение местоположения) их устройств с модулями беспроводного доступа в зонах доступа к информационным ресурсам с целью ограничения несанкционированного доступа и выполнения требований политики безопасности университетской сети [6].

Разработка данных методов определения местоположения клиентского оборудования беспроводной связи является одной из важных проблем применения технологий беспроводных сетей. С одной стороны, это позволяет владельцу мобильного устройства с требуемой точностью обнаружить свое местоположение на карте или плане здания или рассчитать положение мобильного устройства относительно других устройств. С другой стороны, позволяет создать точки привязки мобильных устройств с модулями беспроводной связи к координатам местности.

Очевидно, что системы локального позиционирования могут быть полезны и при использовании в беспроводных сетях с рассматриваемой архитектурой. Использование данных технологий возможно при позиционировании объектов на небольших пространствах, особенно в закрытых помещениях, где возникают проблемы с сигналами систем глобального позиционирования и проблемы с определением местоположения через операторов сотовой связи. Определение локальной позиции абонента с мобильным устройством на плане ограниченной местности (университетского кампуса) или внутри зданий необходимо при работе систем персональной информационной поддержки студентов и преподавателей. На основании информации о местоположении пользователя он может регистрироваться и получать требуемую информацию от ближайших к нему точек WiFi или Bluetooth доступа, сенсорных ZigBee-узлов.

3. Методология позиционирования и локализации мобильных объектов

Разработка систем позиционирования мобильных и стационарных узлов с высокой точностью в помещениях с использованием базовых станций и мобильных узлов разных беспроводных сегментов является актуальной научно-исследовательской задачей.

Методология, как правило, должна включать совокупность методик и технологий, которые могут применяться как по отдельности, так и в комбинации друг с другом. В частности, разработанная методология позиционирования и локализации мобильных объектов в беспроводной гетерогенной сети включает:

- математические модели для решения задачи позиционирования;
- модели и методику калибровки эмпирической модели затухания радиосигнала с учетом особенностей строительных конструкций в зонах позиционирования;
- методику позиционирования в беспроводных сегментах WiFi на основе измерения уровня сигнала RSSI (Received Signal Strength Indication) (рис. 1);
- методику позиционирования в беспроводных сегментах Bluetooth на основе измерения уровня сигнала RSSI;
- методику позиционирования в сенсорных сетевых сегментах ZigBee на основе измерения уровня сигнала RSSI и времени распространения сигнала;
- методику улучшения точности позиционирования на основе привязки к координатам в глобальной навигационной системе.

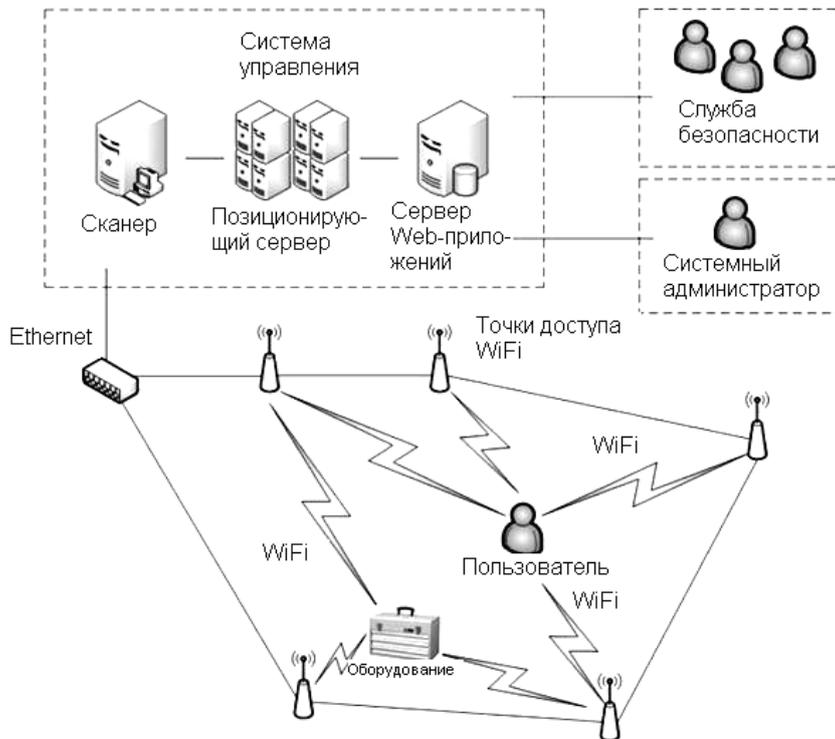


Рис. 1. Локализация в сетях WiFi

Конечными результатами работы методов позиционирования являются не только определение местоположения мобильного клиента, а его идентификация и аутентификация, активация определенных действий со стороны информационной системы, активация работы программных и информационных систем, реакция различного оборудования и т.д. при попадании мобиль-

ного узла в определенные точки местности или плана здания. Поэтому в проекте разработана не просто методика определения местоположения, а методология поддержки принятия решения при обнаружении и локализации мобильных узлов, включающая способы активации устройств, сенсорных узлов, программно-информационных систем и виртуальных объектов, а также поддержки методики слежения за передвижениями мобильных узлов (tracking) с реагированием на их перемещения.

Методика измерения расстояний на основе уровня принимаемого сигнала применяется в сетевых сегментах всех трех беспроводных технологий стандартов IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) и IEEE 802.15.4 (ZigBee), так как все передатчики данных стандартов аппаратно поддерживают возможность измерения параметра RSS. Оценка расстояния происходит с учетом соотношения

$$P(d) = P(d_0) - 10n \log_{10}(d/d_0) \text{ [дБм]},$$

где P – уровень принимаемого сигнала, в децибелах относительно милливатта, дБм; n – коэффициент ослабления сигнала.

Для оценки расстояния в процессе локализации в двумерной системе координат необходимо проводить позиционирование по крайней мере относительно трех базовых станций [9] методом триангуляции.

Наилучшие же измерения можно сделать путем привязки локальной системы координат к глобальной навигационной системе путем установки одной станции в здании с GPS/ГЛОНАСС модулем и выносной приемной антенной, что сделано в процессе создания подсистемы глобального позиционирования.

В реальных условиях число «видимых» базовых станций в зоне локализации при перемещении мобильного узла представляет собой случайную величину, поэтому используется методика улучшения точности позиционирования для преобразования опорных векторов позиционирования относительно точек привязки к координатам глобальной навигационной системы типа NAVSTAR(GPS) или ГЛОНАСС.

При реализации методики на внешнем элементе строительной конструкции (в целях лучшего приема на максимально высоком или открытом) устанавливается антенна навигационного приемника, которая считается реперным опорным узлом глобальной системы координат. Для повышения точности позиционирования представляется возможным использовать калиброванную эмпирическую модель затухания радиоволн с учетом особенностей строительных конструкций конкретного здания, калибровка которой производится экспериментальным способом в процессе настройки системы позиционирования. Другой вариант повышения точности – использовать «отпечатки» всего множества измеренных в точке значений RSS для поиска наиболее схожего образца «отпечатка» среди созданных при калибровке системы вместо определения расстояний до базовых станций.

4. Экспериментальная гетерогенная среда с беспроводным доступом к информационным ресурсам

Разработанное гетерогенное пространство в данном случае предоставляет возможность применения беспроводных сетевых устройств, работающих

в одном частотном диапазоне, но использующих разные стандарты передачи цифровой информации. В настоящее время на рынке представлены в большинстве устройства, работающие в диапазоне 2,4 ГГц, которые позволяют строить беспроводные сетевые сегменты трех основных категорий:

- 1) локальные офисные сети WiFi стандартов IEEE 802.11 b/g/n;
- 2) персональные сети Bluetooth стандарта IEEE 802.15.1;
- 3) сенсорные сети ZigBee стандарта IEEE 802.15.4.

Так как в большинстве российских вузов уже развернуты и эксплуатируются сети технологии Ethernet, то целесообразно объединять беспроводные сетевые сегменты на основе данной Ethernet-сети, которая будет выполнять роль магистрали (backbone), а беспроводные сегменты – роль подсетей доступа для мобильных абонентов и подсетей мониторинга технических объектов. Тогда для беспроводных сегментов роль интерфейсных шлюзов будут выполнять:

- 1) точки доступа и маршрутизаторы WiFi для ячеек IEEE 802.11 b/g/n;
- 2) точки доступа Bluetooth для пикосетей IEEE 802.15.1;
- 3) координаторы ZigBee для кластеров IEEE 802.15.4.

Использование устройств, работающих в одном диапазоне, создает проблему помехоустойчивости и влияния взаимных радиопомех на производительность работы сети. Поэтому для повышения помехоустойчивости в каналах связи данных беспроводных сетей применяются методы расширения спектра передаваемого сигнала.

Рассмотрим основное оборудование, которое использовано на кафедре «Системы автоматизированного проектирования» и в центре дистанционного образования (ЦДО) Пензенского государственного университета (близко территориально расположенных) для построения беспроводных сегментов гетерогенной сети с двумя основными функциями:

1) поддержка беспроводного доступа с мобильных устройств студентов в кафедральное и университетское информационное пространство и выхода во внешний оптоволоконный интернет-канал посредством технологий WiFi (802.11g/n) и Bluetooth (802.15.1);

2) выполнение интегративной функции, т.е. поддержка шлюзования при объединении разных сегментов на базе единой университетской Ethernet-сети. При этом оборудование Bluetooth и WiFi является интерфейсом для обеспечения доступа к информационным ресурсам, поддержки технологий идентификации и позиционирования пользователей сети, а оборудование ZigBee – интерфейсом для сбора телеметрической информации с технических, охранных и пожарных систем, систем доступа и радиoidентификации мобильных узлов, систем слежения и т.д.

4.1. Сегмент беспроводного доступа на базе технологии WiFi

Для построения беспроводного WiFi-сегмента на кафедре САПР и в ЦДО Пензенского государственного университета был выбран маршрутизатор ASUS WL-500W, поддерживающий вместе со старыми стандартами IEEE 802.11b/g высокоскоростной стандарт IEEE 802.11n с возможностью передачи данных на скорости до 300 Мбит/с.

Маршрутизатор установлен таким образом, чтобы обеспечить покрытие территории всей кафедры и ЦДО университета. Тестирование работы

мобильных устройств в зоне доступа маршрутизатора показало, что даже в худшем случае, в отдаленных аудиториях с перекрытиями в три стены мощность достаточна для успешного подключения. Так как маршрутизацией в экспериментальной гетерогенной сети на данном этапе разработки должен заниматься один маршрутизатор, который установлен в проводном Ethernet сегменте, то стандартная заводская прошивка ASUS WL-500W была обновлена до прошивки версии 2.0.0.1. Она позволяет использовать устройство в режиме работы точки доступа без выполнения функций маршрутизации, настроить его так, чтобы могло подключаться наибольшее число различных типов устройств. Кафедральная точка доступа была настроена таким образом, чтобы не создавать помех ближайшим университетским точкам доступа.

На маршрутизаторе включен встроенный DHCP-сервер, который позволяет автоматически подключать мобильные устройства пользователей с выделением адресов из диапазона кафедральной подсети и подсети ЦДО университета, а также ограничить несанкционированный доступ студентов в общую сеть.

4.2. Сегмент беспроводного доступа на базе технологии Bluetooth

Идея организации доступа к информационным ресурсам не только по сети WiFi, но и на основе пикосетей Bluetooth обоснована тем, что основные модели мобильных телефонов имеют данный радиомодуль, подавляющее большинство студентов использует такие сотовые телефоны, а не устройства, в которых есть WiFi-радиомодуль [12].

Для организации зоны Bluetooth доступа для мобильных клиентов выбрано устройство D-link DBT-900AP. Точка доступа является технологическим решением по беспроводному доступу множества студентов к информационным образовательным ресурсам через пикосеть Bluetooth.

Преимуществом ее использования являются небольшая цена и «прозрачность» с точки зрения подключения к проводной среде. При ее установке не требуется специальных драйверов и выполнения сложных сетевых настроек. Для того чтобы создать и поддерживать «сквозное» соединение персональной беспроводной пикосети и локальной сети Ethernet (PAN-LAN) в точке доступа присутствует соответствующий профиль, согласно которому в соответствии со стандартами Bluetooth 1.1 и IEEE 802.3u Ethernet обеспечивается беспроводный доступ к сети.

Точка доступа установлена в лабораторной аудитории кафедры САПР и также позволяет подключаться к кафедральной и университетской сети для доступа к учебно-методическим ресурсам. Таким образом, устройство D-Link DBT-900AP используется для расширения сервисов локальной сети кафедрального сегмента университетского информационного пространства на устройства с модулями Bluetooth связи, такие как сотовые телефоны, коммуникаторы, смартфоны и КПК.

Система предполагает событийное управление различными сценариями поведения для совершения заранее определенных действий в зависимости от определения местоположения мобильного Bluetooth-устройства. Эта технология может быть также использована в музеях для предоставления посетителям различной информации о музейных артефактах [13], рядом с которыми посетитель находится в данный момент времени (рис. 2).

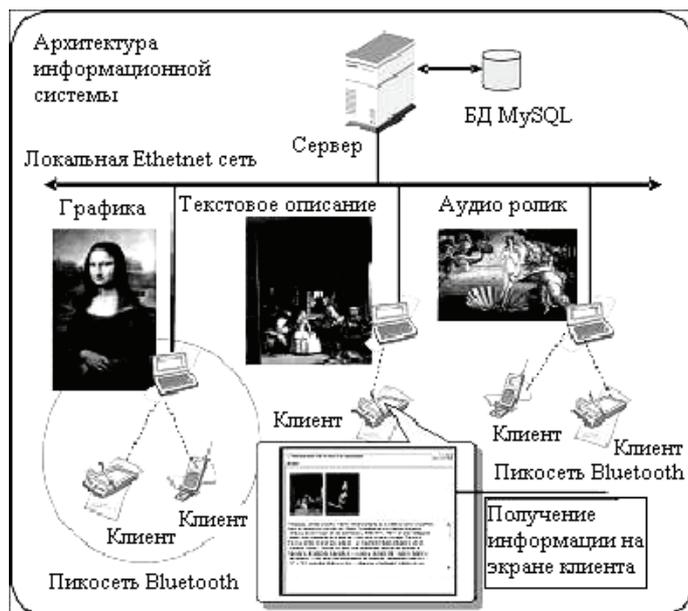


Рис. 2. Информационная поддержка посетителей в сети Ethernet-Bluetooth

4.3. Сегмент беспроводного доступа на базе технологии Zigbee

Сегодня на рынке присутствует широкий спектр оборудования для построения сетей с использованием технологии Zigbee. Для проведения научных исследований студентами и аспирантами и создания экспериментальных кластерных сегментов различного назначения на кафедре САПР Пензенского государственного университета используются сетевые отладочные комплекты от ведущих производителей данного оборудования. В частности, с помощью комплектов моделируются и исследуются возможности создания следующих служб, сервисов и систем на основе сенсорных сетей:

- управление мобильными группами оперативно-тактического назначения путем передачи сообщений и голосового трафика низкоскоростными (low bitrate) кодеками (вокодерами) в автономных самоорганизующихся сетях;
- беспроводные системы оперативного диспетчерского управления инженерными коммуникациями, системами жилищно-коммунального хозяйства и другими системами промышленной автоматики на примере сетей тепло-, водо- и энергоснабжения в городских условиях;
- службы мониторинга (биологического, медицинского, технического, экологического и т.д.) в информационных инфраструктурах территории;
- создание систем распределенной обработки информации в самоорганизующихся кластерных сегментах с децентрализованным механизмом управления;
- синтез и исследование элементов «повсеместных, всепроникающих» сетей с поддержкой механизма «бесшовного» соединения сетей с разными протокольными стеками для передачи информации между беспроводными и проводными сегментами.

Для создания экспериментального гетерогенного информационного пространства с элементами «повсеместной» сенсорной сети используются отладочные комплекты сенсорных сетей:

- 1) комплект фирмы JENNIC (модель JENNIC JN5139-EK010);
- 2) комплекты фирмы Digi (MaxStream);
 - модель Xbee-PRO 868 Starter Kit;
 - модель Xbee-PRO 868 Development Kit);
 - модель XBee-PRO USB 2.4 GHz Comm ZigBee;
- 3) комплект фирмы Telegesis (модель ETRX2);
- 4) комплект фирмы Texas Instrument (модель EZ430-RF2480).

Все названные комплекты предоставляют полную среду для быстрой разработки беспроводных приложений и подключения различных датчиков и приборов. Библиотеки, предусмотренные стандартом IEEE 802.15.4 и спецификацией ZigBee, поддерживают различные топологии сенсорных сегментов (звезда, дерево, шина и ячеистая сеть) с централизованным и децентрализованным механизмом управления информационным трафиком и обеспечивают самоорганизацию при активации узлов и самовосстановление функциональных возможностей сети для надежной связи при отказе узлов.

Заключение

На сегодня экспериментальная гетерогенная сеть с поддержкой различных вариантов беспроводного доступа к информационным ресурсам введена в опытную эксплуатацию на кафедре САПР и ЦДО Пензенского государственного университета.

Информационная система обеспечивает студентов возможностью получения учебно-методических материалов и прочей информации, хранящихся на серверах кафедры и ЦДО, с различных мобильных устройств в любое время и в любых аудиториях, находящихся в зонах приема. Также обеспечивается шлюз для выхода в университетскую сеть. Система обеспечивает возможность подключения по проводному Ethernet-соединению, по беспроводным Bluetooth- и WiFi-каналам, и даже модемное подключение мобильных средств связи к сегментам экспериментальной сенсорной сети в процессе выполнения лабораторных и практических работ. Поддерживается возможность передачи информации между протокольными стеками разных подсетей на основе IP-маршрутизации для организации принципа 4A «повсеместного» (ubiquitous) доступа к информационным ресурсам с поддержкой мобильности пользователей. Реализованы функции идентификации и локализации пользователей беспроводной сети.

Основной целью является реализация на практике новых технологий мобильного (m-learning) образования и подготовки к внедрению технологий «повсеместного» (u-learning) образования будущего на основе беспроводных «всепроницающих» сетей следующего поколения.

Список литературы

1. **Финогеев, А. Г.** Беспроводные технологии передачи данных для создания систем управления и персональной информационной поддержки / А. Г. Финогеев // Информационно-телекоммуникационные системы. – 2008. – 51 с. – URL: http://window.edu.ru/window/library?p_rid=56177.
2. **Финогеев, А. Г.** Перспективные исследования в области создания мобильных систем управления и персональной информационной поддержки / А. Г. Финогеев, В. А. Маслов, А. А. Финогеев // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе (IT+S&E'08) : труды 35 Международной кон-

- ференции (Майская сессия) [Прил. к журн. Открытое образование] (Ялта – Гурзуф, Украина, Крым, 20–30 мая 2008 г.). – Ялта, 2008. – С. 169–172.
3. **Finogeev, A. G.** System of the removed management 3D-presentations for virtual museums and galleries / Alexey G. Finogeev // EVA 2006 Florence; Cappellini, Vito; Hemsley, James (2006) (Eds.): Electronic Imaging & the Visual Arts. Proceedings of the EVA 2006 conference, April 3–7. – Florence, Italy, 2006. – С. 93–99.
 4. **Финогеев, А. Г.** Моделирование исследования системно-синергетических процессов в информационных средах : монография / А. Г. Финогеев. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2004. – 223 с.
 5. **Ganu, S.** Architecture and prototyping of an 802.11-based self-organizing hierarchical ad-hoc wireless network (SOHAN) : International Symposium on Personal / S. Ganu, S. Zhao, L. Raju, B. Anepu, I. Seskar and D. Raychaudhuri // Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2004). – 2004. – September.
 6. **Маслов, В. А.** Локализация в беспроводных сетях / В. А. Маслов, А. Г. Финогеев // Надежность и качество : сборник трудов Международного симпозиума. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2009. – Т. 1. – С. 234–237.
 7. **Zhi-li, Wu.** Location Estimation via Missing Value Support Vector Regression / Wu Zhi-li, Li Chun-hung, Ng Joseph, Karl R. P. H. Leung // Department of Information and Communications Technology of Hong Kong Institute of Vocational Education. – 2003.
 8. **Финогеев, А. Г.** Сравнительный анализ методов позиционирования в беспроводных системах связи / А. Г. Финогеев, В. А. Маслов // Телематика–2009 : сборник трудов XVI Всероссийской научно-методической конференции. – СПб., 2009. – С. 283–284.
 9. **Резников, М. Б.** Геолокация в сотовых сетях с использованием трех базовых станций / М. Б. Резников // Труды научной конференции по радиофизике. – Нижний Новгород : Изд-во НГГУБ, 2005. – С. 202.
 10. **Teemu, Roos.** A Statistical Modeling Approach to Location Estimation / Teemu Roos, Petri Myllymäki, Henry Tirri // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2002. – V. 1, № 1. – P. 1.
 11. **Финогеев, А. Г.** Методика идентификации и событийного управления мобильными устройствами на основе технологии Bluetooth / А. Г. Финогеев, В. А. Маслов, А. А. Финогеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 2. – С. 64–71.
 12. **Финогеев, А. Г.** Построение информационного пространства вуза с использованием беспроводной технологии Bluetooth / А. Г. Финогеев, В. А. Маслов, Д. А. Кувшинников, А. А. Финогеев // Прикладная информатика. – 2008. – № 6 (18). – С. 101–109.
 13. **Finogeev, A. G.** Interactive system for information support museum visitors on base Bluetooth technologies / Alexey G. Finogeev, Vladinir A. Maslov, Anton A. Finogeev, Kirill A. Bukin // EVA 2008 Florence; Cappellini, Vito; Hemsley, James (2008) (Eds.) : Electronic Imaging & the Visual Arts. Proceedings of the EVA 2008 conference, April 16–18, Florence, Italy: Le Officine Grafiche Technoprint. – Bologna, 2008. – С. 152–157.

Финогеев Алексей Германович

доктор технических наук, профессор,
кафедра систем автоматизированного
проектирования, Пензенский
государственный университет

E-mail: finogeev@sura.ru

Finogeev Aleksey Germanovich

doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of CAD systems,
Penza State University

Маслов Владимир Алексеевич
Аспирант, Пензенский
государственный университет
E-mail: mvaco@mail.ru

Maslov Vladimir Alekseevich
Postgraduate student,
Penza State University

Финогеев Антон Алексеевич
аспирант, Пензенский
государственный университет
E-mail: fanton3@yandex.ru

Finogeev Anton Alekseevich
Postgraduate student,
Penza State University

УДК 519.688:621.396.99

Финогеев, А. Г.

Структура электронной образовательной среды с использованием гетерогенных сетей для доступа к информационным ресурсам / А. Г. Финогеев, В. А. Маслов, А. А. Финогеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 106–116.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 53.088.7, 612.172.4

А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, Л. Ю. Кривоногов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ РАЗЛИЧНОГО ВИДА

Аннотация. Показано, что эффективность обработки электрокардиосигналов напрямую зависит от качества устранения помех. Предложено для подавления помех в электрокардиосигнале использовать метод декомпозиции на эмпирические моды. Разработан алгоритм помехоподавления, основанный на удалении отдельных мод частотных составляющих электрокардиосигнала. Проведена оценка качества помехоподавления.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, декомпозиция на эмпирические моды, частотные составляющие.

Abstract. The article shows that electrocardiosignals processing efficiency depends directly on the quality of noise elimination. The authors offer to use a method of empirical mode decomposition for noise-suppression in electrocardiosignals. They have designed a noise-suppression algorithm based on removing separate mode-frequency components of electrocardiosignals. The authors have also conducted noise-reduction quality assessment.

Key words: electrocardiosignal, empirical mode decomposition, frequency components.

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения, сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) прочно занимают первое место в мире по причинам смертности [1]. Диагностика и профилактика ССЗ является важной народно-хозяйственной задачей. Для своевременной профилактики, ранней диагностики, прогнозирования и эффективного лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы широко используются медицинские информационные системы (МИС), направленные на выполнение задач обработки и анализа медицинской информации. Несмотря на значительные успехи, достигнутые за полувековую историю развития МИС, остаются вопросы, требующие дополнительной проработки. К таким вопросам относится помехозащищенная обработка и анализ электрокардиографической информации в условиях интенсивных помех различного вида [2].

Эффективная работа МИС для обработки и анализа медицинских сигналов напрямую связана с точностью измерения количественных показателей (амплитудных и временных параметров) сигналов, с достоверностью обнаружения и распознавания их отдельных элементов, их границ и т.д. В свою оче-

редь основной причиной погрешностей измерений и ошибок постановки диагностического заключения являются помехи, различные по своему происхождению, интенсивности, взаимодействию с сигналом, спектральным и статистическим характеристикам и т.д. Помехи могут настолько исказить сигнал, что он становится непригодным даже для визуальной интерпретации [3].

1. Обзор существующих методов помехозащищенной обработки ЭКС

Недостаточная разработка существующей проблемы, ее комплексный, междисциплинарный характер объясняют стремление исследователей в технологически передовых странах интенсивно развивать методы помехозащищенной обработки и анализа медицинских сигналов, в том числе электрокардиографических, и проектировать кардиографические системы на их основе. Достаточно сослаться на далеко неполный перечень трудов российских ученых, посвященных помехозащищенной обработке и анализу кардиографической информации [4–7].

Наибольший интерес представляют работы [6, 7], в рамках которых разработаны методы и алгоритмы помехозащищенной обработки ЭКС. Предлагаемые методы обработки ЭКС нашли широкое применение при разработке алгоритмов и программ к современным автоматизированным системам обработки и анализа ЭКС в условиях интенсивных помех различного вида, существовавших на мировом рынке не одно десятилетие. Однако применение новых математических теорий и синтез их с уже устоявшейся теоретической базой помехозащищенной обработки ЭКС позволяет сделать вывод, что предлагаемые методы обработки и анализа сигналов в условиях интенсивных помех различного вида имеют определенные недостатки, связанные в основном либо с неполным подавлением помех, либо с искажением полезной информации в сигнале.

Искажающие ЭКС интенсивные помехи, с точки зрения их проявления, целесообразно разделить на следующие виды:

- высокочастотные (ВЧ) помехи: сетевая помеха и мышечный тремор;
- низкочастотные (НЧ) помехи: дрейф изолинии и артефакт движения.

Кроме четырех перечисленных помех есть и другие (высокочастотные шумы электродов и усилителей; импульсные помехи), попадающие через сеть при включении мощной медицинской аппаратуры [2].

Существующие методы и алгоритмы обработки и анализа ЭКС в условиях интенсивных помех различного вида в основном основаны на преобразовании Фурье и Вагнера-Вайла, а также на теории вейвлет-преобразования. Наибольшее применение для разработки алгоритмов обработки и анализа ЭКС получили методы на основе вейвлет-преобразования. Тому есть логическое объяснение [8]:

– вейвлет-преобразование позволяет анализировать ЭКС путем разложения по базисным функциям, полученным из некоторого прототипа путем сжатий, растяжений и сдвигов;

– вейвлет-преобразование обладает практически всеми достоинствами преобразований Фурье;

– вейвлетные базисы могут быть хорошо локализованными как по частоте, так и по времени. При выделении в сигналах хорошо локализованных разномасштабных процессов можно рассматривать только те масштабные уровни разложения, которые представляют интерес;

– вейвлетные базисы, в отличие от преобразования Фурье, имеют достаточно много разнообразных базовых функций, свойства которых ориентированы на решение различных задач. Базисные вейвлеты могут иметь и конечные, и бесконечные носители, реализуемые функциями различной гладкости.

Однако, как показала практика, применение вейвлет-преобразования для обработки и анализа ЭКС в условиях интенсивных помех различного вида приводит к ряду недостатков, присущих данному преобразованию [3]:

– низкая эффективность подавления интенсивных помех различного вида, обусловленная невозможностью адаптации базового вейвлета к локальным особенностям зарегистрированного сигнала;

– невозможность учета всех локальных особенностей конкретного исследуемого электрокардиосигнала и сопровождающих его интенсивных помех.

Алгоритмы на основе вейвлет-преобразования позволяют исследовать тонкие, локальные особенности процессов, протекающих в ЭКС. Однако практически невозможно подобрать определенный материнский вейвлет для всего многообразия исследуемых сигналов и сопровождающих их помех. Кроме того, применение вейвлет-преобразования для подавления низкочастотных помех, по мнению авторов, вообще малоэффективно.

Таким образом, разработка эффективной автоматизированной системы обработки и анализа ЭКС в условиях интенсивных помех различного вида возможна благодаря применению современных, высокоточных и, главное, адаптивных методов обработки и анализа кардиографической информации, способных приспособиться к индивидуальным особенностям и параметрам пациента. Альтернативой вейвлет-преобразованию для обработки и анализа ЭКС должен быть метод, способный подавлять помехи в сигнале не по заранее определенному базису, а по адаптивному базису, полученному непосредственно из самих исследуемых данных, учитывая их структуру, параметры и наличие возможных видов помех.

2. Разработка системы помехозащищенной обработки ЭКС

Современная автоматизированная система обработки и анализа ЭКС должна удовлетворять следующим требованиям [2]:

– простота, эффективность и адаптивность разрабатываемой системы обработки и анализа ЭКС для подавления помех различного вида;

– высокая точность подавления помех в ЭКС при использовании адаптивного базиса;

– возможность формирования новых потенциальных возможностей при обработке и анализе ЭКС, как, например, выявление патологических отклонений в работе сердечно-сосудистой системы на ранней стадии их развития;

– возможность использования для дальнейшего внедрения в программируемые интегральные схемы в качестве программного модуля современных диагностических систем.

Возможным методом, удовлетворяющим требованиям современной автоматизированной системы обработки и анализа ЭКС, является метод декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ). ДЭМ является адаптивным методом анализа нестационарных сигналов. Базис, используемый для разложения сигнала, конструируется непосредственно из самого исследуемого сигнала. Это позволяет учесть все его локальные особенности, внутреннюю структуру, присутствие различных помех. Кроме адаптивности, ДЭМ обладает и други-

ми важными для практических приложений свойствами: ортогональностью и полнотой. Полнота гарантирует, что если сигнал имеет конечную длительность, то число мод (базисных функций) тоже конечно. Свойство ортогональности обеспечивает восстановление сигнала с определенной точностью [9].

Метод ДЭМ достаточно прост в реализации и требует сравнительно небольшого объема вычислений. В общем виде алгоритм представлен в работе [9]. Суть его заключается в том, что входной сигнал подвергается адаптивному разложению на частотные составляющие. Результатом этого разложения является функция

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(t) + r_n(t),$$

где $f_i(t)$ – набор эмпирических мод; $r_n(t)$ – остаточный член, не подлежащий разложению (глобальный тренд ЭКС).

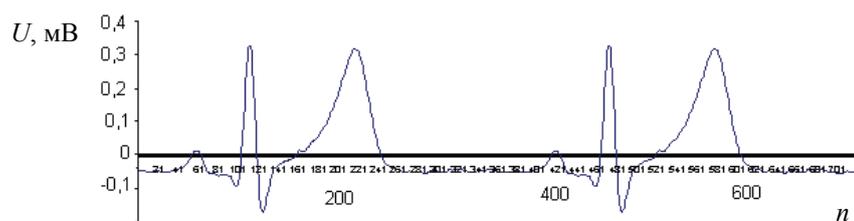
Таким образом, каждая функция $f_i(t)$ является монокомпонентной, имеет свой характерный временной масштаб осцилляций, который убывает с ростом ее номера i , а процесс вычисления сводится к устранению локального тренда, соответствующего данному масштабу. На рис. 1 приведен пример декомпозиции на эмпирические моды фрагмента ЭКС (а – исходный ЭКС; б, в, г – эмпирические моды; д – глобальный тренд). Эмпирические моды получены путем применения ДЭМ последовательно для каждого сигнала, начиная с исходного ЭКС, зарегистрированного с частотой дискретизации 500 Гц. Из ЭКС получена первая мода с частотой 250 Гц (рис. 1,б), а из нее получена следующая с частотой 125 Гц (рис. 1,в) и т.д. Каждая эмпирическая мода, представленная на рис. 1, получена путем разложения предыдущей. Мода, представленная на рис. 1,д, является глобальным трендом ЭКС и дальнейшему разложению не подлежит.

Подавление помех на основе базового алгоритма ДЭМ [10] предусматривает декомпозицию сигнала на эмпирические моды, удаление некоторых мод (соответствующих помехам) и последующее восстановление сигнала. Эксперименты показали, что в этом случае не обеспечивается достаточное качество подавления высокочастотных помех (сетевой помехи и тремора мышц). Удаление даже первой (высокочастотной) моды приводит к заметному искажению восстановленного ЭКС.

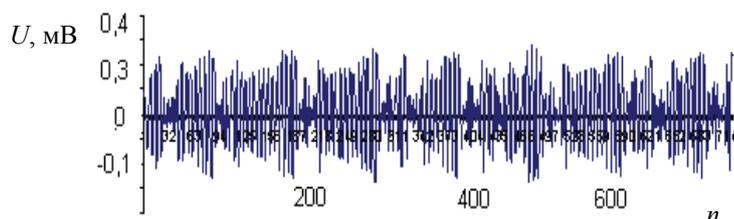
Одним из подходов к повышению качества подавления помех в ЭКС является предварительное разделение ЭКС на частотные составляющие (ЧС), раздельная их декомпозиция на эмпирические моды и удаление некоторых мод ЧС [10]. Исследования показали, что и в этом случае качество помехоподавления недостаточное.

Авторами предложена автоматизированная система помехозащитной обработки ЭКС, выполняющая декомпозицию частотных составляющих сигнала и удаления отдельных мод частотных составляющих, вычисление уровня помех в сигнале и вывод ЭКС. В общем виде работа системы описана алгоритмом, представленным на рис. 2.

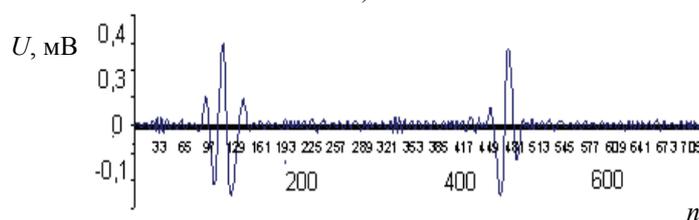
В результате проведенных экспериментов было доказано, что выполнение действия 4 разработанного алгоритма позволяет эффективно избавляться от низкочастотных помех: дрейфа изолинии и артефакта движения. Выполнение действий 5–9 алгоритма позволяет эффективно избавляться от высокочастотных помех: сетевой помехи и мышечного тремора.



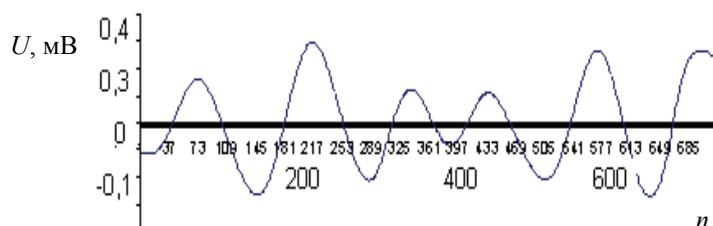
а)



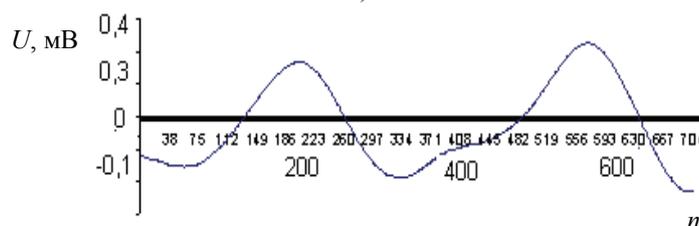
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Декомпозиция ЭКС на эмпирические моды

Оценка качества подавления помех в известных [10] и разработанном алгоритмах осуществляется следующим образом:

– выделение фрагмента зарегистрированного ЭКС с минимальным уровнем помех. Этот фрагмент считается эталонным ЭКС (рис. 1,а);

- зашумление эталонного ЭКС (рис. 3,б), в качестве помехи используется сетевая помеха и артефакт движения;
- подавление помех в зашумленном ЭКС.

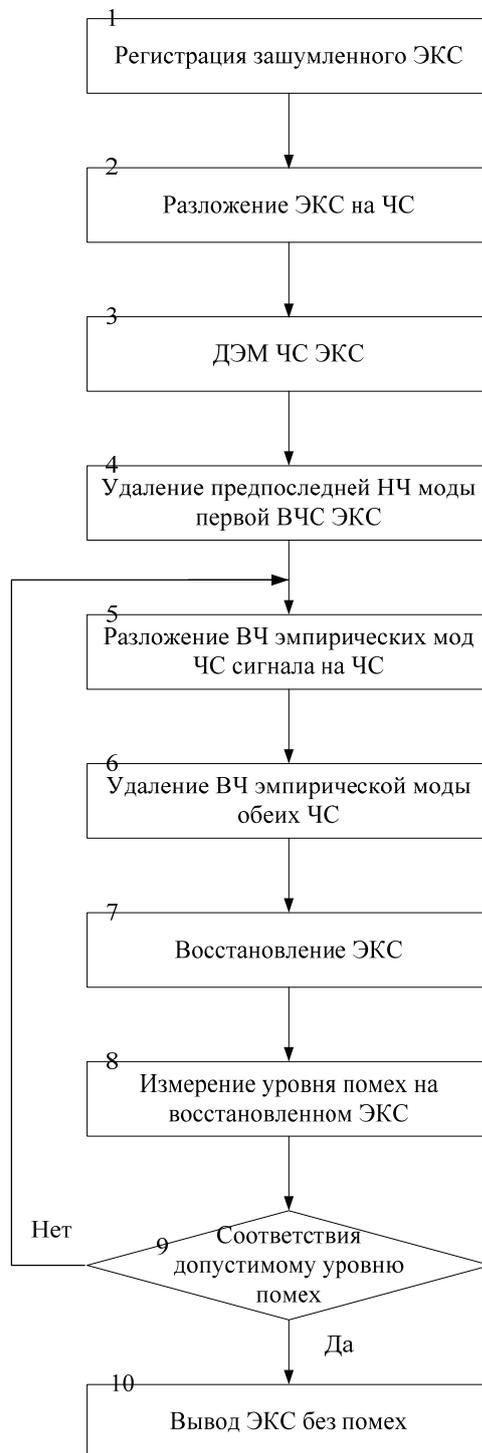


Рис. 2. Алгоритм подавления помех в ЭКС

При этом в соответствии с известными алгоритмами подавления помех [10] в электрокардиосигнале получены два сигнала (рис. 3). На рис. 3,б показан восстановленный ЭКС при удалении первой высокочастотной моды, на рис. 3,в представлен восстановленный ЭКС при удалении первых двух высокочастотных мод. Результат работы предложенного алгоритма помехоподавления приведен на рис. 3,г.

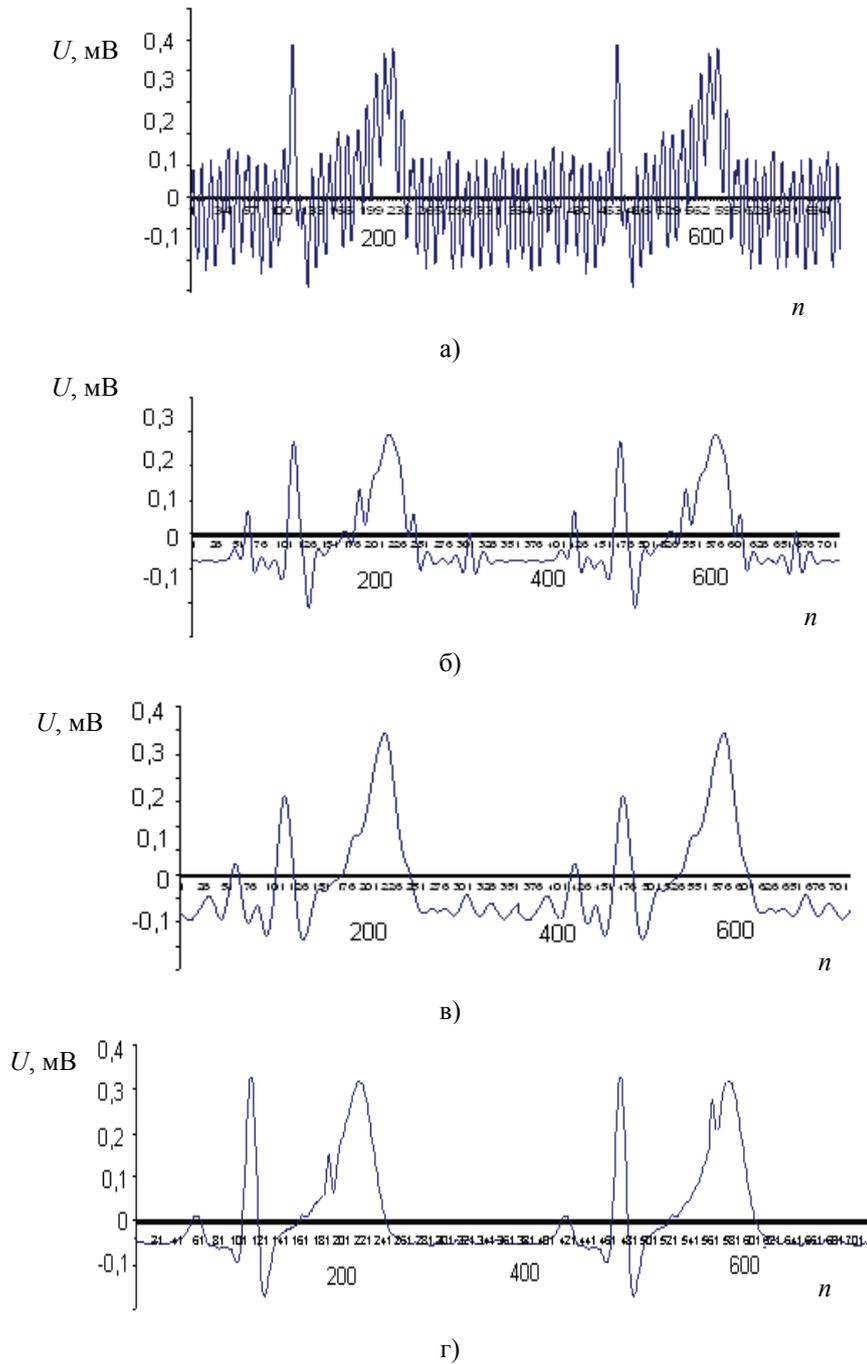


Рис. 3. Результат работы алгоритмов подавления помех в ЭКС

Для количественной оценки качества помехоподавления использована среднеквадратическая ошибка отклонения восстановленного сигнала y_i (на выходе фильтра) от эталонного ЭКС x_i (percent root-mean-square difference – PRD) [11]:

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \cdot 100 \%,$$

где n – объем выборки.

В табл. 1 приведены значения среднеквадратической ошибки (PRD, %) для пяти различных алгоритмов при подавлении помех трех видов.

Таблица 1

Алгоритмы	Вагнера – Вайла	Вейвлет	Классический ДЭМ	ДЭМ
Сетевая помеха	38,1	53,0	37,8	11,1
Артефакт движения	22,3	54,6	41,7	11,0
Мышечный тремор	22,2	37,5	55,4	9,4

Заключение

Результат работы автоматизированной системы помехозащищенной обработки ЭКС доказал свою эффективность на примере систем на основе классического алгоритма ДЭМ, Вагнера – Вайла и вейвлет преобразования. Показано, что ни одна из существующих систем не обеспечивает полного подавления помех в сигнале, не искажая информативную составляющую сигнала. Разработанная система помехозащищенной обработки ЭКС достаточно эффективно устраняет низкочастотные и высокочастотные помехи практически без искажения сигнала.

Список литературы

1. Доклад о состоянии здравоохранения в мире // Всемирная организация здравоохранения. – 2008. – URL: [http:// www.who.int/ru](http://www.who.int/ru) (официальный сайт ВОЗ (дата обращения: 01.09.2010)).
2. **Кривоногов, Л. Ю.** Вопросы адаптивной обработки электрокардиосигнала / Л. Ю. Кривоногов, А. Ю. Тычков // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы : материалы Международной научно-технической конференция с элементами научной школы для молодежи. – Рязань : Изд-во РГРТУ, 2009. – С. 458–460.
3. **Кривоногов, Л. Ю.** Проблема повышения эффективности диагностики сердечно-сосудистых заболеваний / Л. Ю. Кривоногов, А. Ю. Тычков // Кардиология на перекрестке наук : тезисы докладов Международного конгресса. – Тюмень : ТКЦ, 2010. – С. 152.
4. **Бодин, О. Н.** Система неинвазивного контроля состояния сердца : дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.17, 05.13.01 / Бодин О. Н. – Пенза, 2008. – 345 с.

5. **Истомина, Т. В.** Методы и средства обработки биоэлектрической информации : дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Истомина Т. В. – Пенза, 2002. – 334 с.
6. **Кривоногов, Л. Ю.** Методы и алгоритмы помехозащищенной обработки электрокардиографической информации : дис. ... кан. техн. наук: 05.13.01 / Кривоногов Л. Ю. – Пенза, 2003. – 189 с.
7. **Фихман, М. И.** Методы и средства определения достоверности результатов автоматического анализа ЭКГ при длительном мониторинговании : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.17 / Фихман М. И. – Новосибирск, 2004. – 178 с.
8. **Сергиенко, А. Б.** Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2002. – 336 с.
9. **Huang, N. E.** The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long // Proc. R.: Soc. Lond. A. – 1998. – V. 454. – P. 903–995.
10. **Detlef, W.** Denoising and artifact rejection for cardiac signal in a senses system / W. Detlef, Z. Honghuan, P. Bryon. – Пат. США № 20080269628. – 2008. – 27 p.
11. **Cohen, A.** Compression of Multichannel ECG Through Multichannel Long Term Prediction / A. Cohen, Y. Zigel // Proc. R.: IEEE BME magazine. – 1998. – V. 17. – P. 109–115.

Тычков Александр Юрьевич
аспирант, Пензенский
государственный университет
E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Alexander Yuryevich
Postgraduate student,
Penza State University

Чураков Петр Павлович
доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники, Пензенский государственный
университет
E-mail: iit@pnzgu.ru

Churakov Petr Pavlovich
Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information-measuring
technology, Penza State University

Кривоногов Леонид Юрьевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра медицинских информационных
систем и технологий, Пензенский
государственный университет
E-mail: leonidkrivonogov@yandex.ru

Krivonogov Leonid Yuryevich
Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of medical information systems
and technologies, Penza State University

УДК 53.088.7, 612.172.4

Тычков, А. Ю.

**Автоматизированная система обработки и анализа электрокардио-
сигналов в условиях интенсивных помех различного вида / А. Ю. Тычков,
П. П. Чураков, Л. Ю. Кривоногов // Известия высших учебных заведений.
Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 117–125.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ ПРОЦЕДУР

Аннотация. Предлагается методика применения параметрического спектрального анализа, в основе которой лежит рекуррентная процедура метода наименьших квадратов. В основе рекуррентного метода предложено применить расчетные параметры средства измерений, что сокращает объем вычислений.

Ключевые слова: динамические характеристики, рекуррентная схема, измерения, параметрический спектральный анализ

Abstract. The authors suggest a method of determining full dynamic characteristics of measurement instruments using the recurrence scheme. The method consists of applying the parametric spectral analysis based on recurrence procedure of least square technique. It is offered to apply calculating parameters of a measurement tool in the core of recurrence method, resulting in minimizing computation intensity.

Key words: dynamic features, recurrence scheme, measurements, parametric spectral analysis.

Введение

При определении полных динамических характеристик средств измерений получают отклики (сигналы), имеющие короткую длительность [2]. В основном для определения полных динамических характеристик датчиков механических величин применяют методы, основанные на Фурье-преобразовании, или параметрические методы спектрального анализа. Методы, основанные на преобразовании Фурье, обладают недостатками, которые делают неэффективным их применение.

Первый недостаток: для обеспечения хорошей разрешающей способности необходимо обрабатывать отклики с достаточно большой длительностью, а в задачах определения полных динамических характеристик отклики имеют короткую длительность.

Второй недостаток: при применении методов, основанных на Фурье-преобразовании, получают частотные характеристики исследуемой системы (объекта), по которым можно вычислить линейные колебания на разных частотах. Но на практике необходимо находить параметры исследуемого объекта. Для этого надо аппроксимировать полученные характеристики, что ухудшает разрешающую способность этих методов для определения требуемых параметров системы.

1. Описание математической модели

Параметрические методы спектрального анализа лишены недостатков, присущих методам, основанным на применении Фурье-преобразования. Для применения параметрических методов необходимы предварительные сведения об испытуемом объекте и знание математической модели объекта.

Разрабатываемый метод должен хорошо вписываться в математическую модель средства измерений и с достаточной точностью описывать динамический режим, протекающий в средствах измерений. Только в этом случае можно получить достаточно приемлемые результаты.

Динамический режим средств измерений в дискретной форме имеет вид

$$y[n] = a_1 y[n-1] + a_2 y[n-2] + \dots + a_{p_a} y[n-p_a] + b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \dots + b_{p_b} x[n-p_b],$$

где $y[i]$ – выходной сигнал; $x[i]$ – входной сигнал; $a_1, a_2, \dots, a_{p_a}, b_0, b_1, \dots, b_{p_b}$ – коэффициенты; p_b, p_a – порядок числителя и знаменателя передаточной функции.

Датчики переменных давлений имеют вид разомкнутого звена. Поэтому динамический режим в дискретной форме описывается авторегрессионными (АР) уравнениями [1]. С учетом того, что $b_i = 0$ (для АР режима) при $i = 1, 2, \dots, p_b$, получим

$$y[n] = a_1 y[n-1] + a_2 y[n-2] + \dots + a_{p_a} y[n-p_a].$$

Связь между входным сигналом и выходным сигналом в z -форме имеет вид

$$Y(z) = H(z)X(z),$$

где $Y(z), X(z), H(z)$ – z -преобразование выходного, входного сигналов и передаточной функции.

С учетом того, что в рассматриваемом случае входным сигналом является дельта-функция (для дельта-функции $X(z) = 1$), имеем

$$Y(z) = H(z),$$

что упрощает задачу определения параметров передаточной функции $H(z)$, так как в рассматриваемом случае отклик сигнала совпадает с импульсной переходной характеристикой.

Для вышеприведенных соотношений импульсная переходная характеристика имеет вид

$$h(t) = \sum_{i=1}^{n_1} A_i e^{-\alpha_i t} \sin(f_i t + \varphi_i) + \sum_{i=1}^{n_2} A_i e^{-\alpha_i t},$$

где $A_i, \alpha_i, f_i, \varphi_i$ – амплитуда, декремент колебания, собственная частота, фаза составляющих модели; t – время; n_1, n_2 – количество экспоненциально затухающих синусоид и количество затухающих экспонент.

В нашем случае задача применения метода параметрического спектрального анализа состоит в нахождении параметров $A_i, \alpha_i, f_i, \varphi_i, n_1, n_2$, соответствующих экспериментальным данным.

Выбор модели такого вида обусловлен тем, что такое описание хорошо вписывается в физическое математическое описание объекта.

2. Описание метода

Связывание параметров самого объекта с параметрами АР-описания, получаемыми непосредственно по экспериментальным данным, намного упрощает процедуру нахождения этих параметров.

Реализация параметрических методов спектрального анализа усложняется тем, что экспериментальные данные содержат помехи, имеющие различный характер. Поэтому вычисляемые параметры получаются смещенными. Отсюда вытекает задача разработки или модификации метода для получения несмещенных оценок параметров объекта, когда экспериментальные данные содержат помехи.

Следующая сложность заключается в том, что применение параметрических методов спектрального анализа подразумевает знание как формы (вида) сигнала, так и количества составляющих модели – порядка модели.

Определение порядка модели – сложная и трудоемкая задача. Хотя имеющиеся подходы к нахождению порядка модели дают удовлетворительные результаты, но при наличии погрешностей порядок модели получается явно завышенным. Поэтому усложним задачу: необходимо разработать метод определения параметров модели на основе экспериментальных данных с возможностью выбора порядка модели.

Метод основан на применении рекуррентной процедуры уточнения результатов обработки, что позволяет, не завышая порядок модели, получить искомые значения параметров объекта.

Метод состоит из трех этапов:

– на первом этапе применяется метод параметрического спектрального анализа – метод Прони;

– на втором этапе применяется рекуррентная процедура уточнения параметров модели;

– на третьем этапе находятся параметры синусоидальных составляющих модели.

На первом этапе минимизируем с применением метода наименьших квадратов невязку U :

$$U = \sum_{i=0}^{N-1} e_i^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (y_i - \bar{y}_i)^2,$$

где U – невязка; N – количество отсчетов; y_i, \bar{y}_i – отсчеты и оценки отсчетов; e_i – ошибки.

Выполняя преобразования с применением метода Прони, находим вектор АР-параметров $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$:

$$\begin{pmatrix} y_p & y_{p-1} & \cdots & y_1 \\ y_{p+1} & y_p & \cdots & y_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{N-1} & y_{N-2} & \cdots & y_{N-p} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} y_{p+1} \\ y_{p+2} \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}.$$

На втором этапе производится уточнение полученных параметров по рекуррентной схеме:

$$\mathbf{A}_{k+1} = \mathbf{A}_k - \mathbf{P}_k \mathbf{R} \frac{\mathbf{R}^T \mathbf{A}_k - r(k)}{1 + \mathbf{R}^T \mathbf{P}_k \mathbf{R}}, \quad \mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k - \frac{\mathbf{P}_k \mathbf{R} \mathbf{R}^T \mathbf{P}_k}{1 + \mathbf{R}^T \mathbf{P}_k \mathbf{R}},$$

где A_k – вектор параметров на k -м шаге рекуррентной процедуры уточнения параметров; $\mathbf{R} = \{r(0), r(1), \dots, r(p)\}$ – авторегрессионные коэффициенты сигнала, рассчитываемые по формуле

$$r(m) = \sum_{i=0}^{N-m} y[i]y[i+m],$$

\mathbf{P}_k – матрица весовых коэффициентов при ошибках.

Для расчета элементов p_{ij} матрицы \mathbf{P} (при $k = 0$) можно использовать различные подходы. Первый подход:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

То есть начальные значения матрицы \mathbf{P} принимаются равными единичной матрице.

Второй подход: матрица \mathbf{P} выбирается диагональной, а значения по главной диагонали вычисляются по следующей формуле:

$$p_{ii} = |a_i| / \sigma_i^2 = |a_i| / \sum_{i=0}^{N-1} e_i^2 = |a_i| / \sum_{i=0}^{N-1} (y_i - \bar{y}_i)^2.$$

Третий подход: изначально диагональным элементам присваиваются большие значения, что соответствует заданию большой дисперсии начальных оценок из-за того, что начальная оценка обладает большой степенью неопределенности.

Рекуррентные вычисления проводят до того момента, пока параметры A не перестанут изменяться в пределах назначенной точности.

Второй этап заканчивается составлением характеристического уравнения

$$z^M - a_1 z^{M-1} - a_2 z^{M-2} - \dots - a_{M-1} z - a_M = 0,$$

решая которое, находим корни z_i .

На третьем этапе по найденным значениям параметров составляют основное соотношение Прони:

$$y[n] = \sum_{i=1}^M b_i z_i^n.$$

Для нахождения вектора $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_M)^T$ составляются соотношения

$$\begin{pmatrix} z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_M^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_M^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_M^{N-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y[1] \\ y[2] \\ \vdots \\ y[N] \end{pmatrix},$$

или в матричном виде:

$$\mathbf{Z}\mathbf{B} = \mathbf{Y}.$$

Применив метод наименьших квадратов, можно получить вектор коэффициентов \mathbf{B} с параметрами b_i :

$$\mathbf{B} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T \mathbf{Y}.$$

Далее находят параметры модели (1) для всех p составляющих

$$\alpha_i = \frac{\ln|z_i|}{\Delta t}, \quad c^{-1}, \quad f_i = \frac{\arctg\left(\frac{\operatorname{Im}(z_i)}{\operatorname{Re}(z_i)}\right)}{2\pi\Delta t} \text{ Гц}, \quad A_i = |b_i|, \quad \varphi_i = \arctg\left(\frac{\operatorname{Im}(b_i)}{\operatorname{Re}(b_i)}\right),$$

где A_i , φ_i , f_i , α_i – амплитуда, фаза, собственная частота и декремент колебания составляющих модели.

По полученным параметрам можно вычислить спектр:

$$S_p(f) = \left| \sum_{i=1}^p A_i \frac{2\pi f_i}{(\alpha_i + 2\pi j f)^2 + 4\pi^2 f_i^2} \right|.$$

Применение разработанной рекуррентной процедуры метода наименьших квадратов в задачах определения полных динамических характеристик средств измерений на примере датчиков быстропеременных давлений позволило расширить частотный диапазон работы этих датчиков.

Заключение

Важным достоинством разработанного метода является возможность применения его в задачах аттестации в серийном производстве. В этом случае за первую итерацию принимаются значения вектора параметров, вычисленных по расчетным значениям параметров модели выбранного типа средства измерений.

На основе разработанного метода определения полных динамических характеристик средств измерений с применением рекуррентной схемы вычислений создана методика, позволяющая получать параметры модели средства измерений с уменьшением объема вычислений.

Список литературы

1. **Щербаков, М. А.** Восстановление входного сигнала по результатам идентификации динамических характеристик средств измерений / М. А. Щербаков, В. П. Иосифов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 3–8.
2. **Щербаков, М. А.** Разработка методик обработки откликов с датчиков с короткой длительностью / М. А. Щербаков, В. П. Иосифов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 245–252.
3. **Иосифов, В. П.** Итерационная методика определения динамических характеристик датчиков по откликам с короткой длительностью / В. П. Иосифов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 17–18.

Иосифов Валерьян Павлович

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник, кафедра
автоматики и телемеханики, Пензенский
государственный университет

E-mail: iosif65@bk.ru

Iosifov Valeryan Pavlovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, senior staff scientist,
sub-department of automation and remote
control, Penza State University

УДК 531.787

Иосифов, В. П.

Определение полных динамических характеристик средств измерений с применением рекуррентных процедур / В. П. Иосифов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 126–131.

СИНТЕЗ $\Sigma\Delta$ -АЦП С МНОГОУРОВНЕВЫМ ЦАП НА ОСНОВЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА

Аннотация. На основе теории непрерывно-дискретных систем предложена методика синтеза $\Sigma\Delta$ -АЦП с многоуровневым ЦАП на основе широтно-импульсного модулятора, отличающихся высокой линейностью преобразования. Приведены результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: $\Sigma\Delta$ -АЦП, непрерывно-дискретная система, аналого-цифровой преобразователь, цифроаналоговый преобразователь, широтно-импульсный модулятор.

Abstract. The article suggests a method of $\Sigma\Delta$ -ADC synthesis with multilevel DAC based on pulse-width modulator. The method is developed according to the theory of analog-digital systems. The $\Sigma\Delta$ -modulators have high linearity of conversion. The author presents the results of simulation modeling.

Key words: $\Sigma\Delta$ -ADC, analog-digital system, analog-to-digital converter, digital-analog converter, pulse-width modulator, transfer function.

Введение

Важнейшими характеристиками средств измерения являются: линейность функции преобразования, помехоустойчивость и динамические свойства (особенно при однократных измерениях). В измерительных устройствах со структурой неканонического вида основным следует считать требование по линейности функции преобразования [1, 2], поскольку именно это обеспечивает использование эффективных методов цифровой обработки сигналов. По этой причине весьма перспективно применение в структуре $\Sigma\Delta$ -АЦП цифроаналогового преобразователя на основе широтно-импульсного модулятора (ШИМ) [3], в котором практически отсутствует погрешность линейности. Однако для обеспечения линейности функции преобразования всего $\Sigma\Delta$ -АЦП необходимо, чтобы преобразование кода в цепи обратной связи в ШИМ сигнал отвечало требованию линейности функции преобразования, т.е. должна быть обеспечена линейная зависимость значений выходных величин интеграторов в прямой цепи преобразования в конце каждого цикла от входных кодов преобразователя «код – ШИМ сигнал». Решение данной задачи в виде методики синтеза преобразователей кода в ШИМ сигнал сложной многопараметрической формы для $\Sigma\Delta$ -модулятора было представлено в работе [3].

1. Синтез $\Sigma\Delta$ -АЦП

Для завершения синтеза $\Sigma\Delta$ -АЦП, структура которого представлена на рис. 1, необходимо решить дополнительно следующие задачи: рассчитать коэффициенты фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), а также коэффициенты масштабирования для структуры непрерывно-дискретной системы с ШИМ в канале обратной связи и идеальным импульсным элементом в прямой цепи преобразования.

Для ШИМ сигнала изображение в операторной форме зависит от относительной ширины импульса ШИМ сигнала ε , который определяет положение

ние фронтов на временной оси и зависит от амплитуды сигнала [3]. Произведем анализ работы устройства по методу временного разделения реакции интеграторов по шагам дискретизации. На первом шаге дискретизации рассмотрим реакцию каждого интегратора и определим состояние интеграторов в конце цикла преобразования. На последующих шагах рассмотрим реакцию по выходу (на входе импульсного элемента) как суперпозицию всех реакций на данное начальное условие. Z -преобразование решетчатой функции с выхода импульсного элемента дает искомое выражение для эквивалентной передаточной функции (ПФ) $H_{\text{эkv}}(z)$. Рассмотрим реализацию данного метода более подробно.

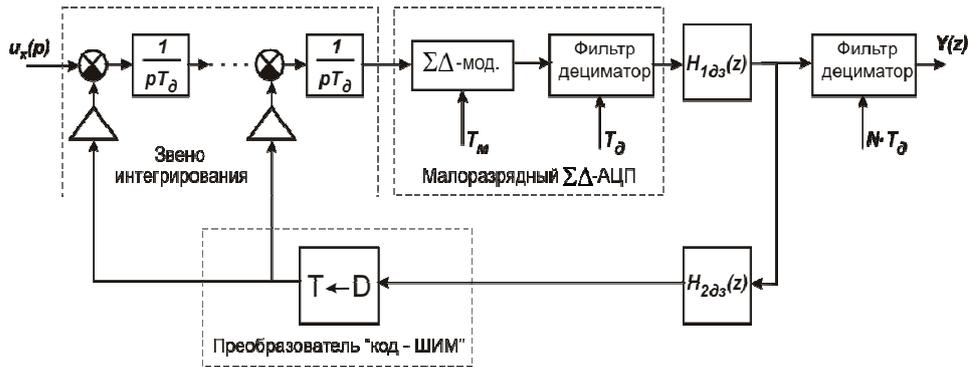


Рис. 1. Структурная схема $\Sigma\Delta$ -АЦП с ЦАП в цепи обратной связи на основе ШИМ сигнала

Для математического описания реакции цепочки n интеграторов на сигнал сложной формы проанализируем структуру прямого канала преобразования сигнала $\Sigma\Delta$ -модулятора, приведенную на рис. 2,а, в которой определены точки выходов каждого элемента, подлежащего анализу (рис. 2,б).

Используя принцип суперпозиции, определим реакцию системы как совокупность реакций на единичные ступенчатые функции. Импульс формируется из двух ступенчатых функций с амплитудами $-U_0$ и $+2U_0$, сдвинутых относительно друг друга на временной интервал $\varepsilon \cdot T_d$. Их суперпозиция описывает реакцию на единичный импульс с передним фронтом в момент времени t_1 и задним фронтом в момент времени t_2 . На интервалах $(t_1 - T_d)$ и $(t_2 - T_d)$ реакция интеграторов – степенная функция, и, следовательно, реакция i -го интегратора определяется выражением

$$u_i(T_d) = \frac{1}{i!} \cdot \left((T_d - t_1)^i - 2(T_d - t_2)^i \right),$$

где i – кратность интегрирования, $i = 1, \dots, n$.

Полученное уравнение позволяет рассчитать начальное состояние интеграторов к концу первого цикла преобразования $u_1(T_d), u_2(T_d), \dots, u_n(T_d)$.

Для последующих циклов преобразования состояние интеграторов можно описать как сумму реакций данного m -го интегратора на начальное состояние интеграторов с индексами $m - 1, m - 2, \dots, 1$, расположенных в цепи перед ним:

$$u_m(t) = u_m(T_d) + u_{m-1}(T_d) \cdot \frac{t - T_d}{1!} + u_{m-2}(T_d) \cdot \frac{(t - T_d)^2}{2!} + \dots + u_1(T_d) \cdot \frac{(t - T_d)^{m-1}}{m!},$$

где m – номер интегратора ($m = 1, \dots, n$).

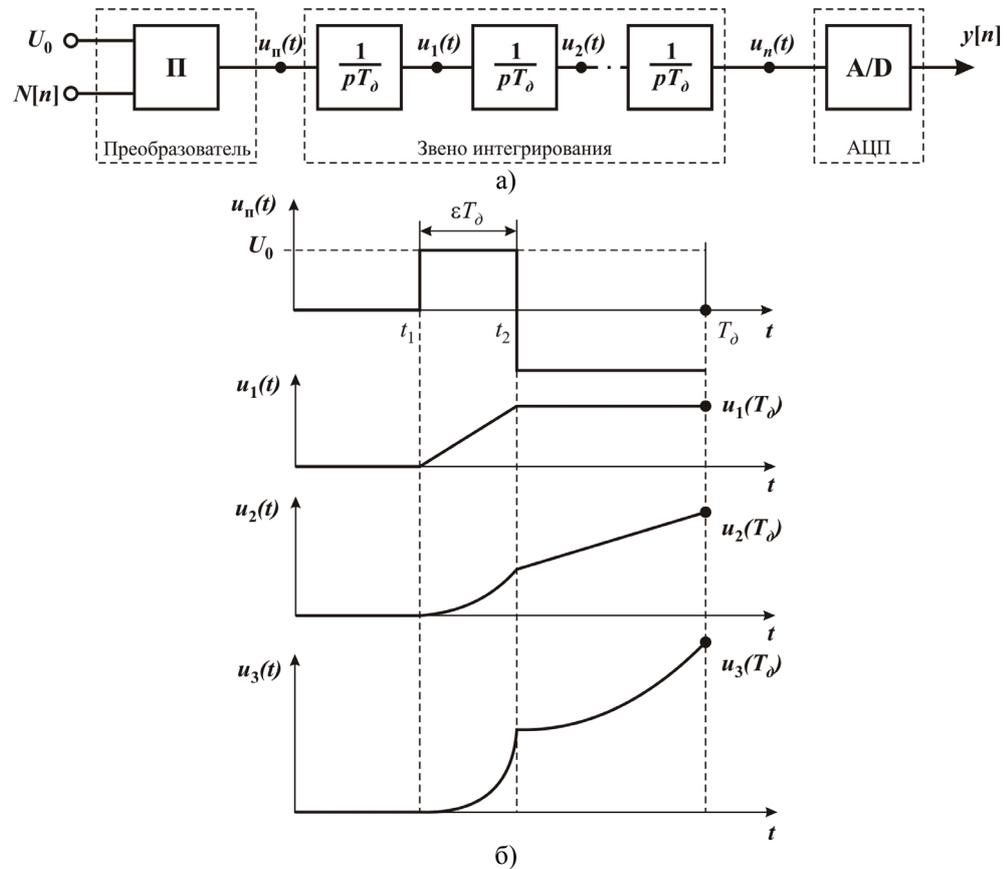


Рис. 2. Функциональная схема прямого тракта преобразования $\Sigma\Delta$ -модулятора n -го порядка (а) и временные диаграммы работы (б)

Сделав подстановку численных значений $u_m(T_d), u_{m-1}(T_d), \dots, u_1(T_d)$ в вышеприведенную формулу и принимая значения $t = T_d, 2T_d, \dots$, получаем решетчатую функцию, z -преобразование от которой дает искомое выражение для определения эквивалентной ПФ $H_m(z)$.

Для уменьшения вычислений достаточно найти z -преобразование от решетчатой функции импульсной характеристики i интеграторов $H_1(z), H_2(z), \dots, H_i(z)$. Общее выражение для эквивалентной ПФ $H_{\text{эКВ}}(z)$ следует искать как сумму $H_1(z), H_2(z), \dots, H_i(z)$, взятых с весами, пропорциональными начальному условию интеграторов $U_1(T_d), U_2(T_d), \dots, U_n(T_d)$:

$$H_{\text{эКВ}}(z) = (U_{1n} \cdot H_1(z) + U_{2n} \cdot H_2(z) + \dots + U_{nn} \cdot H_n(z)) \cdot z^{-1}.$$

В полученном выражении для учета задержки на один цикл преобразования введен сомножитель z^{-1} . Остальные этапы расчета ПФ фильтров КИХ

и БИХ, а также масштабирующего коэффициента λ остаются без изменений согласно методике синтеза $\Sigma\Delta$ -АЦП, приведенной в [4, 5].

Результаты расчета ПФ фильтров КИХ и БИХ, а также масштабирующего коэффициента λ для структуры АЦП с трехкратным интегрированием с ШИМ в обратной связи и идеальным импульсным элементом в прямой цепи преобразования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Количество интеграторов (m)	Масштабный коэффициент (λ)	ПФ цифровых КИХ фильтров	ПФ цифровых БИХ фильтров
3	10,00168451	$W_3(z) = 1 - 62/47z^{-1} + 23/44z^{-2}$	$V(z) = 1 + 145/64z^{-1} + 23/64z^{-2}$

Корректность математических расчетов подтверждается имитационным моделированием в системе Simulink. На рис. 3 приведена Simulink-модель АЦП с трехкратным интегрированием с ШИМ в ОС и идеальным импульсным элементом в прямой цепи преобразования. На временной диаграмме переходного процесса в точке V видно, что реакция на ступенчатое воздействие финитна и оканчивается в течение трех циклов работы. Это подтверждает корректность принятых математических моделей и правильность аналитических выкладок.

2. Синтез $\Sigma\Delta$ -АЦП с интегрирующим АЦП в канале прямого преобразования

Рассмотрим вопрос синтеза структуры $\Sigma\Delta$ -АЦП с интегрирующим АЦП в канале прямого преобразования, реализующего прямоугольную весовую функцию. В этом случае необходимо учесть представление информации не по мгновенным, а по интегральным значениям.

На этапе нахождения z -преобразования реакции цепочки интеграторов на ступенчатую единичную функцию в структуре модели $\Sigma\Delta$ -АЦП (рис. 3) импульсный элемент заменим интегрирующим АЦП.

Результаты расчета ПФ фильтров КИХ и БИХ, а также масштабирующего коэффициента λ для структуры с интегрирующим АЦП однократного интегрирования в канале прямого преобразования и ШИМ в цепи обратной связи согласно методике, приведенной в [4, 5], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Количество интеграторов (m)	Масштабные коэффициенты (λ)	ПФ цифровых КИХ фильтров	ПФ цифровых БИХ фильтров
3	5,107243151	$W(z) = 1 - 2/3z^{-1}$	$V(z) = 1 + 13/8z^{-1} + 1/4z^{-2}$

На рис. 4 приведена Simulink-модель (а) и временные диаграммы (б), из которых видно, что реакция на ступенчатое воздействие финитна и оканчивается в течение двух циклов работы. Это подтверждает правильность произведенных расчетов.

Как было указано [3], потенциально реализация ЦАП с ШИМ сигнала возможна в многопетлевых структурах $\Sigma\Delta$ -АЦП. Причем, в отличие от клас-

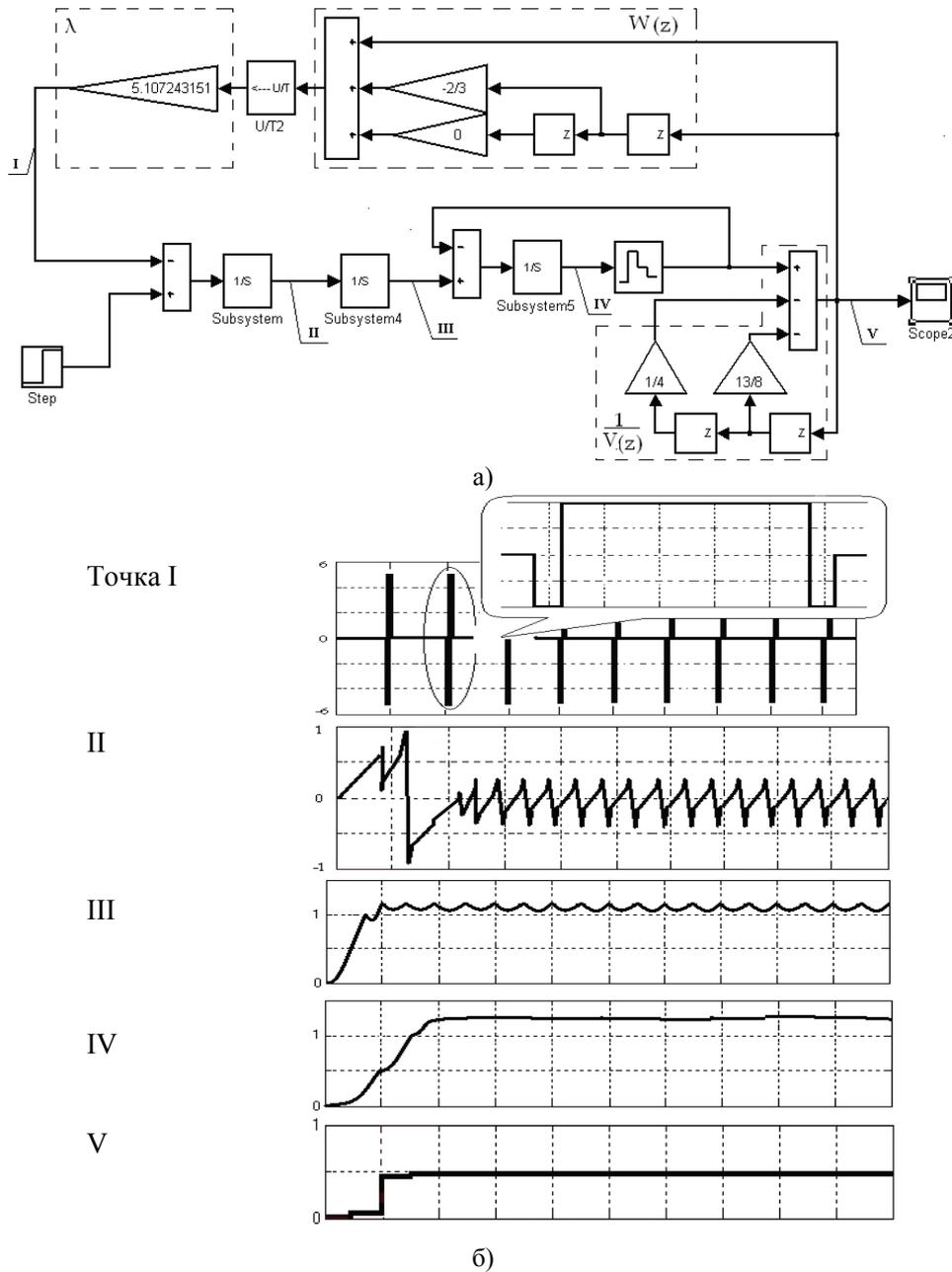


Рис. 4. Simulink-модель $\Sigma\Delta$ -АЦП с интегрирующим АЦП в прямом канале преобразования (а) и осциллограммы напряжений в характерных точках (б)

Заключение

Проектирование $\Sigma\Delta$ -АЦП с ЦАП на основе ШИМ сигнала в цепи обратной связи предполагает выполнение следующих процедур:

1. Синтез преобразователей кода в ШИМ сигнал сложной многопараметрической формы.
2. Расчет коэффициентов фильтров с конечной импульсной характеристикой и бесконечной импульсной характеристикой.

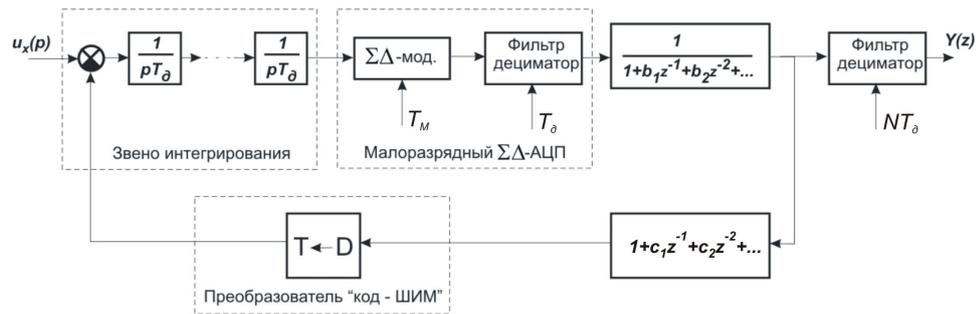


Рис. 5. Структурная схема $\Sigma\Delta$ -АЦП с ЦАП на основе ШИМ сигнала в цепи обратной связи, охватывающей первый каскад фильтра-дециматора

3. Расчет коэффициентов масштабирования для структуры непрерывно-дискретной системы с ШИМ в канале обратной связи и идеальным импульсным элементом в прямой цепи преобразования.

4. Реализация $\Sigma\Delta$ -АЦП с ШИМ сигнала в цепи обратной связи, охватывающей первый каскад фильтра-дециматора.

Список литературы

1. **Ашанин, В. Н.** Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Информационно-издательский центр ПензГУ, 2009. – 214 с.
2. **Ашанин, В. Н.** Проблемы теории анализа и синтеза интегрирующих преобразователей информации гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1. – С. 84–91.
3. **Ашанин, В. Н.** Синтез $\Sigma\Delta$ -модулятора с многоуровневым ЦАП на основе широтно-импульсной модуляции сигнала / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 4. – С. 97–105.
4. **Чувькин, Б. В.** $\Sigma\Delta$ -АЦП: синтез одноконтурных структур / Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 91–106.
5. **Чувькин, Б. В.** $\Sigma\Delta$ -АЦП: синтез структур высоких порядков / Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 69–81.

Ашанин Василий Николаевич

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и транспортного электрооборудования, Пензенский государственный университет

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Ashanin Vasily Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, professor, head of sub-department of electrical engineering and transport electrical equipment, Penza State University

УДК 621.3.087.92

Ашанин, В. Н.

Синтез $\Sigma\Delta$ -АЦП с многоуровневым ЦАП на основе широтно-импульсного модулятора / В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 132–138.

И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев,
Ю. Т. Медведик, П. М. Стеблев, А. А. Трофимов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ГРАФОВ ДЛЯ РАСЧЕТА СХЕМ УЗЛОВ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ И АНАЛИЗА ИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Аннотация. Предложен метод расчета операционных усилителей на основе использования топологических графов, что позволяет резко сократить объем вычислений за счет перехода от принципиальных электрических схем узлов средств измерений непосредственно к графам и к функциям преобразования.

Ключевые слова: операционный усилитель, топологический граф, коэффициент усиления, исток, сток.

Abstract. The article introduces a method of calculating operational amplifiers based on the use of topological graphs. Application of the method allows to drastically reduce the amount of computation due to transition from principal electrical circuit units of measurement tools directly to graphs and functions of the transformation.

Key words: operational amplifier, topological graph, gain, source, drain.

Введение

Расчет узлов средств измерений на операционных усилителях (ОУ) с реальными характеристиками связан с решением систем уравнений высокого порядка. Электрической схемой замещения ОУ является трехполюсник, который описывается системой трех уравнений. Измерительный усилитель, использующий три ОУ, описывается системой девяти уравнений, и ее решение представляет весьма сложную задачу. Использование топологических графов позволяет во много раз упростить решение данных задач при переходе от принципиальной электрической схемы непосредственно к топологическому графу, на основании которого можно получить функцию передачи усилителя, его входное и выходное сопротивления.

1. Применение формулы Мезона для определения значения коэффициента передачи инвертирующего ОУ

На рис. 1,а представлена электрическая схема инвертирующего ОУ, а на рис. 1,б – соответствующий топологический граф, который является графическим изображением системы линейных уравнений (1).

Топологический граф содержит исток – источник входного напряжения $U_{\text{вх}}$, зависимые узлы 1 и 2, соответствующие напряжениям на инвертирующем e^- и неинвертирующем e^+ входах ОУ и сток – узел 3. Потенциалу стока соответствует напряжение на выходе усилителя $U_{\text{вых}}$.

Работа инвертирующего усилителя описывается соотношениями:

$$\begin{cases} e^+ = e^- g_{\text{вх}} (g_{22})^{-1}; \\ e^- = U_{\text{вх}} g_1 (g_{11})^{-1} + e^+ g_{\text{вх}} (g_{11})^{-1} + U_{\text{вых}} g_2 (g_{11})^{-1}; \\ U_{\text{вых}} = -ke^- + ke^+, \end{cases} \quad (1)$$

где g_{11} и g_{22} – собственные проводимости узлов 1 и 2, равные сумме проводимостей всех ветвей, сходящихся соответственно в этих узлах:

$$g_{11} = g_1 + g_2 + g_{\text{вх}}; g_{22} = g_3 + g_{\text{вх}},$$

причем проводимость $g_i = (R_i)^{-1}$ при $i = 1, 2, 3$; k – коэффициент усиления ОУ.

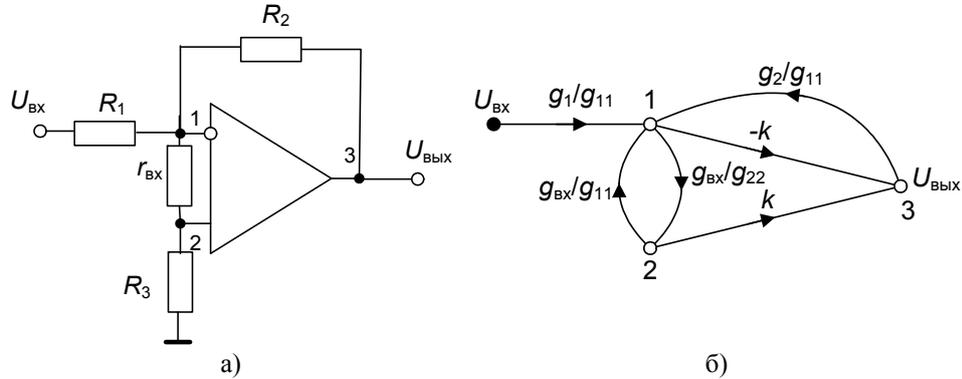


Рис. 1. Схема и топологический граф операционного усилителя:
 R_1, R_2, R_3 – навесные резисторы; $r_{\text{вх}}$ – дифференциальное входное сопротивление ОУ; k – реальное значение коэффициента усиления ОУ;
 $U_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}$ – напряжения на входе и выходе ОУ соответственно

Первые два уравнения системы составлены по законам Кирхгофа в соответствии с методом узловых потенциалов. Третьему уравнению соответствуют односторонние передачи входных сигналов e^+ и e^- дифференциального усилителя на его выход.

Коэффициент передачи реального ОУ определим по топологическому графу (рис. 1,б) с учетом реальных значений входного сопротивления ОУ – $r_{\text{вх}}$ и коэффициента усиления дифференциального входного сигнала k :

$$G_{\text{иу}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2}{\Delta} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2}{1 - (L_1 + L_2 + L_3)}, \quad (2)$$

где P_1 и P_2 – пути от истока $U_{\text{вх}}$ к стоку $U_{\text{вых}}$; Δ_1 и Δ_2 – алгебраические дополнения соответствующих путей; $\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3)$ – определитель данного графа.

В топологическом графе коэффициенты передачи двухузловых контуров L_1, L_2 и трехузлового контура L_3 равны произведениям коэффициентов передач входящих в них ветвей:

$$L_1 = \frac{g_{\text{вх}}^2}{g_{11} g_{22}}; L_2 = \frac{-k g_2}{g_{11}}; L_3 = \frac{k g_2 g_{\text{вх}}}{g_{11} g_{22}}.$$

Коэффициенты передач путей P_1 и P_2 равны [1]

$$P_1 = U_{\text{вх}} \frac{g_1}{g_{22}} (-k); P_2 = U_{\text{вх}} \frac{g_1}{g_{11}} \frac{g_{\text{вх}}}{g_{22}} k,$$

а алгебраические дополнения коэффициентов передач путей $\Delta_1 = \Delta_2 = 1$, так как в топологическом графе нет контуров, не касающихся путей P_1 и P_2 .

Подставляя в (2) выражения для коэффициентов передачи путей и контуров, получим коэффициент передачи реального ОУ:

$$G_{\text{иу(реал)}} = \frac{-kg_1(g_{22})^{-1} \left[1 - g_{\text{вх}}(g_{22})^{-1} \right]}{1 - \frac{g_{\text{вх}}^2}{g_{11}g_{22}} + \frac{kg_2}{g_{11}} \left[1 - g_{\text{вх}}(g_{22})^{-1} \right]}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражения для коэффициентов передачи g_{11} и g_{22} , после преобразований получим значение коэффициента передачи реального ОУ:

$$G_{\text{иу(реал)}} = \frac{-kg_1g_3}{kg_2g_3 + (g_1 + g_2 + g_3)g_{\text{вх}} + (g_1 + g_2)g_3}. \quad (4)$$

Для идеального инвертирующего ОУ с учетом того, что $k \rightarrow \infty$, $g_{\text{вх}} \rightarrow 0$, после упрощений получим

$$G_{\text{иу(ид)}} = -\frac{g_1}{g_2} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

2. Применение формулы Мезона для определения значения коэффициента передачи неинвертирующего ОУ

На рис. 2,а представлен неинвертирующий операционный усилитель ОУ, а на рис. 2,б – соответствующий ему топологический граф.

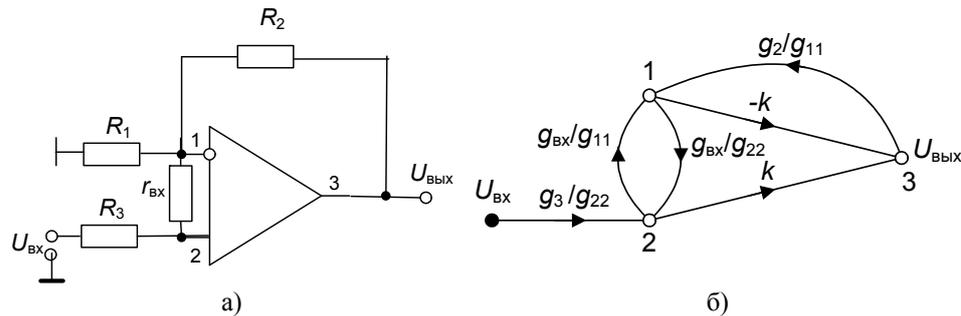


Рис. 2. Схема и граф неинвертирующего операционного усилителя

Топологическому графу соответствует система линейных уравнений:

$$\begin{cases} e^- = e^+ \frac{g_{\text{вх}}}{g_{11}} + U_{\text{вых}} \frac{g_2}{g_{11}}; \\ e^+ = e^- \frac{g_{\text{вх}}}{g_{22}} + U_{\text{вх}} \frac{g_3}{g_{22}}; \\ U_{\text{вых}} = -ke^- + ke^+. \end{cases} \quad (6)$$

Из топологического графа (рис. 2,б) определим коэффициент передачи реального неинвертирующего ОУ:

$$G_{\text{ну(реал)}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2}{\Delta} = \frac{\frac{g_3}{g_{22}} k \left(1 - \frac{g_{\text{ВХ}}}{g_{11}}\right)}{1 + \frac{kg_2}{g_{11}} - \frac{kg_2 g_{\text{ВХ}}}{g_{11} g_{22}} - \frac{g_{\text{ВХ}}^2}{g_{11} g_{22}}}, \quad (7)$$

здесь $\Delta_1 = \Delta_2 = 1$, а определитель данного графа $\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3)$, где коэффициенты передач контуров равны:

$$L_1 = -\frac{kg_2}{g_{11}}; L_2 = \frac{kg_2 g_{\text{ВХ}}}{g_{11} g_{22}}; L_3 = -\frac{g_{\text{ВХ}}^2}{g_{11} g_{22}}.$$

Для идеального неинвертирующего ОУ с учетом того, что $k \rightarrow \infty$, $g_{\text{ВХ}} \rightarrow 0$ после ряда упрощений получим [2]

$$G_{\text{ну(ид)}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{g_{11}}{g_2} = \frac{g_1 + g_2}{g_2} = 1 + \frac{g_1}{g_2} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (8)$$

при $k \rightarrow \infty$
 $g_{\text{ВХ}} \rightarrow 0$

При необходимости большого усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителей в цепи обратной связи используются резисторы с высоким значением номиналов. Это приводит к увеличению влияния помех и наводок. Данный недостаток можно исключить использованием инвертирующих или неинвертирующих ОУ с Т-образной обратной связью.

3. Применение формулы Мезона для определения значения коэффициента передачи неинвертирующего и инвертирующего ОУ с Т-образной обратной связью

На рис. 3 представлены неинвертирующий ОУ с Т-образной обратной связью и его топологический граф соответственно.

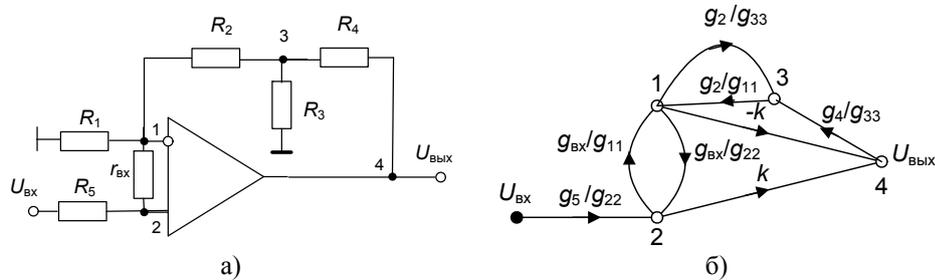


Рис. 3. Неинвертирующий операционный усилитель с Т-образной обратной связью и его граф: g_{11}, g_{22}, g_{33} – собственные проводимости узлов 1, 2, 3, значения которых равны $g_{11} = g_1 + g_2 + g_{\text{ВХ}}$; $g_{22} = g_5 + g_{\text{ВХ}}$; $g_{33} = g_2 + g_3 + g_4$, проводимость $g_i = (R_i)^{-1}$

Из рис. 3,б получим следующую формулу Мэсона [1] для топологического графа:

$$G_{\text{ну(реал)}} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2}{1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)}. \quad (9)$$

Здесь $\Delta_1 = 1 - L_4$, $\Delta_2 = 1$. Определитель топологического графа будет равен $\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)$, где коэффициенты передачи четырехузлового контура $L_2 = k \frac{g_2 g_4 g_{BX}}{g_{11} g_{33} g_{22}}$, трехузлового контура $L_1 = -k \frac{g_2 g_4}{g_{11} g_{33}}$, двухузловых контуров $L_3 = \frac{g_{BX}^2}{g_{11} g_{22}}$ и $L_4 = \frac{g_2^2}{g_{11} g_{33}}$, а коэффициенты передачи путей $P_1 = k \frac{g_5}{g_{22}}$, $P_2 = \frac{g_5 g_{BX}}{g_{22} g_{11}} (-k)$. Подставляя выражения для коэффициентов передач путей, алгебраических дополнений и контуров в (9), получим выражение для коэффициента передачи реального неинвертирующего ОУ с Т-образной обратной связью:

$$G_{\text{ну(реал)}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\frac{g_5}{g_{22}} k \left(1 - \frac{g_2^2}{g_{11} g_{33}} \right) + \frac{g_5}{g_{22}} \frac{g_{BX}}{g_{11}} (-k)}{1 + k \frac{g_2 g_4}{g_{11} g_{33}} \left(1 - \frac{g_{BX}}{g_{22}} \right) - \frac{g_2^2}{g_{11} g_{33}} - \frac{g_{BX}^2}{g_{11} g_{22}}}. \quad (10)$$

Для идеального неинвертирующего усилителя, полагая, что $k \rightarrow \infty$, $g_{BX} \rightarrow 0$, после ряда упрощений получим [2]:

$$G_{\text{ну(ид)}} = 1 + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} = 1 + \frac{R_2 + R_4 + R_2 R_4 (R_3)^{-1}}{R_1} + \frac{R_4}{R_3}. \quad (11)$$

На рис. 4 представлены инвертирующий ОУ с Т-образной обратной связью и его топологический граф соответственно.

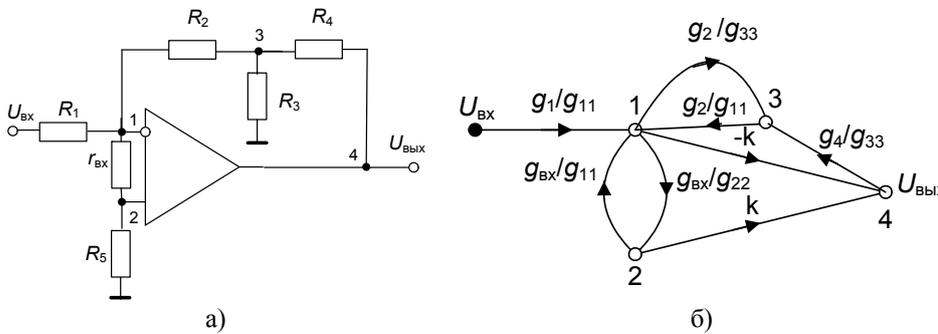


Рис. 4. Инвертирующий ОУ с Т-образной обратной связью и его граф

Определим реальный и идеальный коэффициенты передачи инвертирующего ОУ с Т-образной обратной связью (рис. 4). Исходя из топологического графа ОУ (рис. 4,б), получим реальный коэффициент передачи:

$$G_{\text{ин(реал)}} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2}{\Delta} = \frac{-k \frac{g_1}{g_{11}} + k \frac{g_1 g_{BX}}{g_{11} g_{22}}}{1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4)}, \quad (12)$$

где P_1, P_2 – коэффициенты передачи путей, алгебраические дополнения которых Δ_1, Δ_2 и $\Delta_1 = \Delta_2 = 1$, так как отсутствуют контуры, не касающиеся данных путей.

Для идеального инвертирующего усилителя, полагая, что $k \rightarrow \infty$, $g_{вх} \rightarrow 0$, получим

$$G_{\text{ну(ид)}} = -\frac{g_1 g_{33}}{g_2 g_4} = -\left(\frac{g_1}{g_4} + \frac{g_1}{g_2} + \frac{g_1 g_3}{g_4 g_2}\right) = -\frac{R_4 + R_2 + \frac{R_2 R_4}{R_3}}{R_1}. \quad (13)$$

4. Анализ погрешностей коэффициента передачи ОУ

Важнейшим параметром средства измерения (СИ) является его передаточная функция. Она выражается через параметры основных узлов СИ как отношение выходной величины к входной. Используя теорию сигнальных графов, можно формализовать и упростить процедуру получения функции преобразования и анализа погрешностей СИ [2]. Передаточная функция характеризуется как передача графа $G = f(g_i)$, где G – коэффициент передачи графа; g_i – коэффициент передачи i -й ветви графа ($i = 1, 2, 3, \dots$), f – функция преобразования [1].

Определим влияние нестабильности i -й ветви графа на нестабильность коэффициента передачи графа:

$$\delta G_{\delta g_i} = \frac{\partial G}{\partial g_i} \frac{\Delta g_i}{G} = \frac{\partial G}{\partial g_i} \frac{g_i}{G} \frac{\Delta g_i}{g_i} = S_{g_i} \delta g_i, \quad (14)$$

где S_{g_i} – весовой коэффициент i -й ветви, показывающий, с каким весом учитывается ее относительная погрешность в общей погрешности передачи графа δG .

Так как относительная погрешность коэффициента передачи i -й ветви графа δg_i , то весовой коэффициент погрешности передачи ветви равен

$$S_{g_i} = \frac{\partial G}{\partial g_i} \frac{g_i}{G}. \quad (15)$$

Для блоков и узлов средств измерений уравнение связи параметров имеет вид дробно-линейной функции

$$G = (ag_i + b)(cg_i + d)^{-1}. \quad (16)$$

Проделив необходимые преобразования над уравнением связи параметров в соответствии с выражением (14), получим выражения S_{g_i} для дробно-линейной функции передачи графа:

$$S_{g_i} = (ad - bc) g_i [(ag_i + b)(cg_i + d)]^{-1}. \quad (17)$$

Из общего выражения для весового коэффициента погрешности передачи δg_i -ветви графа получим значения для часто встречающихся частных случаев, получаемых при равенстве нулю одного из коэффициентов в передаче графа (17):

$$- \text{если } a = 0, \text{ то } G = b(cg_i + d)^{-1}, \text{ а } S_{g_i} = -(1 + d/cg_i)^{-1}; \quad (18)$$

$$- \text{если } b = 0, \text{ то } G = ag_i(CG_i + d)^{-1}, \text{ а } S_{gi} = (1 + CG_i/d)^{-1}; \quad (19)$$

$$- \text{если } c = 0, \text{ то } G = (ag_i + b)(d)^{-1}, \text{ а } S_{gi} = (1 + b/ag_i)^{-1}; \quad (20)$$

$$- \text{если } d = 0, \text{ то } G = (ag_i + b)(CG_i)^{-1}, \text{ а } S_{gi} = -(1 + ag_i/b)^{-1}; \quad (21)$$

$$- \text{если } b = 0 \text{ и } d = 0, \text{ то } S_{gi} = 1; \quad (22)$$

$$- \text{если } a = 0 \text{ и } c = 0, \text{ то } S_{gi} = -1. \quad (23)$$

Использование формулы Мэсона резко упрощает процедуру нахождения функции передачи графа. Данная методика универсальна в смысле применения системного подхода, т.е. последовательного ее применения к информационно-измерительным системам и комплексам, к структурам средств измерений, к блокам и узлам этих структур и, наконец, к отдельным элементам блоков и узлов. Удобным в расчетах является использование расширенных графов. В них узлы, являющиеся независимыми источниками входного, опорного, компенсирующего или пилообразного напряжений, напряжения смещения представляются ветвями расширенного графа. Так как они входят в коэффициент передачи графа, то их нестабильности влияют на его нестабильность. Данное обстоятельство позволяет выделить аддитивную погрешность как нестабильность независимых источников и мультипликативную составляющую общей погрешности измерения как нестабильности коэффициентов передачи отдельных ветвей расширенного графа.

Для этого введем в расширенный граф единичный узел, потенциал или ток которого равен единичному значению соответствующего параметра. Этот узел будет общим узлом всех независимых источников, а значения выходных параметров источников будут коэффициентами передач ветвей, исходящих из единичного узла.

В качестве примера рассмотрим применение данной методики к анализу погрешностей блоков и узлов СИ на основе ОУ, например, для анализа погрешностей коэффициента передачи инвертирующего усилителя (рис. 2,а). Реальный коэффициент передачи его в соответствии с выражением (4) имеет следующий вид:

$$G_{\text{иу(реал)}} = \frac{-kg_1g_3}{kg_2g_3 + (g_1 + g_2 + g_3)g_{\text{вх}} + (g_1 + g_2)g_3}. \quad (24)$$

Здесь знаменатель выражения (24) является определителем Δ графа, а сам граф представляет собой частный случай дробно-линейной функции.

Так как все параметры входят в выражение (24) в первой степени, то оно представляет собой дробно-линейную функцию. Весовые коэффициенты погрешностей S_{gi} определяются частными случаями (18) и (19). Тогда выражения для весовых коэффициентов отдельных частных составляющих погрешности реального коэффициента передачи инвертирующего ОУ будут иметь следующий вид:

$$S_{g1} = -[1 + (g_1g_{\text{вх}} + g_1g_3)(kg_2g_3 + g_2g_{\text{вх}} + g_3g_{\text{вх}} + g_2g_3)^{-1}]^{-1}; \quad (25)$$

$$S_{g2} = [1 + (kg_2g_3 + g_2g_{\text{вх}} + g_2g_3)(g_1g_3 + g_1g_{\text{вх}} + g_3g_{\text{вх}})^{-1}]^{-1}; \quad (26)$$

$$S_{g_{\text{вх}}} = -[1 + [(g_1 + g_2 + g_3)g_{\text{вх}}[kg_2g_3 + (g_1 + g_2)g_3]^{-1}]^{-1}.; \quad (27)$$

$$S_{gk} = -[1 + kg_2g_3 [(g_1 + g_2 + g_3)g_{\text{вх}} + (g_1 + g_2)g_3]^{-1}]^{-1}; \quad (28)$$

$$S_{g_3} = [1 + (g_1 g_{вх} + g_1 g_3)(g_2 g_3 + g_2 g_{вх} + g_3 g_{вх})^{-1}]^{-1}. \quad (29)$$

Так как значения проводимостей ветвей графа g_i меньше единицы, а значение коэффициента передачи ОУ больше тысячи, то весовой коэффициент погрешности S_{g_i} может иметь как очень малое значение, так и значение, близкое к единице. Значение весового коэффициента погрешности S_{g_i} определяется положением коэффициента передачи операционного усилителя k (в числителе или знаменателе). Когда значение весового коэффициента погрешности S_{g_i} близко к единице, требования к параметрам схем наиболее высокие.

Заключение

Использование топологических графов позволяет получить выражения для коэффициентов передач ОУ без составления систем уравнений и их решения. Это приводит к резкому сокращению времени на проведение расчетов.

Использование топологических графов позволяет во много раз упростить решение данных задач за счет непосредственного перехода от принципиальной электрической схемы к топологическому графу, на основании которого можно получить функцию передачи усилителя и произвести анализ погрешности измерений.

Список литературы

1. **Мэзон, С.** Электрические цепи, сигналы и системы / С. Мэзон, Г. Циммерман. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 619 с.
2. **Добровинский, И. Р.** ИИС для измерения параметров электрических цепей / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев. – М. : Энергоатомиздат, 1999. – 120 с.
3. **Гутников, В. С.** Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Л. : Энергоатомиздат, 1998. – 203 с.

Добровинский Игорь Рувимович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники, Пензенский государственный
университет

E-mail: idobr@tl.ru

Dobrovinskiy Igor Ruvimovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information-measuring
technology, Penza State University

Ломтев Евгений Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники, Пензенский государственный
университет

E-mail: rectorat@pnzgu.ru

Lomtev Evgeny Alexandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information-measuring
technology, Penza State University

Медведик Юрий Тимофеевич

кандидат технических наук, ассистент,
кафедра электротехники и транспортного
электрооборудования, Пензенский
государственный университет

E-mail: yura.medvedik@mail.ru

Medvedik Yuriy Timofeevich

Candidate of engineering sciences, assistant,
sub-department of electrical engineering
and transport electrical equipment,
Penza State University

Стеблев Павел Михайлович
аспирант, Пензенский
государственный университет
E-mail: rs-pilot@bk.ru

Steblev Pavel Mikhaylovich
Postgraduate student,
Penza State University

Трофимов Алексей Александрович
аспирант, Пензенский
государственный университет
E-mail: trof.aa@mail.ru

Trofimov Aleksey Alexandrovich
Postgraduate student,
Penza State University

УДК 621.317.7

Добровинский, И. Р.

Использование топологических графов для расчета схем узлов средств измерений на операционных усилителях и анализа их погрешностей / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев, Ю. Т. Медведик, П. М. Стеблев, А. А. Трофимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 139–147.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Аннотация. Изучено влияние нагрузки на гармонический состав тока и напряжения в основной сети электроснабжения. Выявлены источники, которые вызывают искажение кривых тока и напряжения, и получены соответствующие гармонические спектры.

Ключевые слова: гармоника, нагрузка, трансформатор, сеть электроснабжения, MATLAB.

Abstract. The article deals with load influence on harmonious structure of current and voltage in the basic electrical network. The authors have discovered sources which cause distortion of curves of current and voltage, and obtained corresponding harmonious spectra.

Key words: harmonic, loading, transformer, electrical supply network, MATLAB.

Введение

В связи с переходом работы организаций, занимающихся производством и распределением электрической энергии, на коммерческую основу актуальной становится проблема определения качества электрической энергии. Электрическая энергия, являющаяся товаром, имеет свои показатели качества.

Качество электрической энергии зависит не только от производителя, но и от параметров потребителей электрической энергии. Негативное влияние на качество электрической энергии оказывают потребители с нелинейной характеристикой. Именно нелинейность нагрузки приводит к возникновению гармонических искажений напряжения сети. Практически речь идет об искажении формы и, как следствие, гармонического состава напряжения не только на зажимах потребителя, но и всей сети электроснабжения.

1. Влияние нелинейной нагрузки на качество электрической энергии

Исследуем влияние параметров нагрузки на такой параметр качества электрической энергии, как гармонический состав напряжения.

В большинстве случаев потребители электрической энергии имеют нелинейную вольт-амперную характеристику. Одними из таких потребителей являются мощные тяговые электровозы переменного тока. Рассмотрим их влияние на гармонический состав тока и напряжения сети электроснабжения.

Пусть сеть электроснабжения состоит из магистральной линии и трансформаторной подстанции (ТП), которая обеспечивает электрической энергией двух потребителей, получающих энергию по двум линиям (рис. 1). При этом один из потребителей (П1) является линейным и может быть представлен в схеме замещения в форме активного сопротивления и индуктивности. Этот потребитель получает питание по воздушной линии (ВЛ) большой протяженности ($l = 100$ км). Вторым потребителем является выпрямительная

установка, питающая двигатель постоянного тока (П2), подключенная к той же подстанции.



Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения

В схеме замещения (рис. 2) магистральная линия представлена в качестве источника переменного напряжения (E) с некоторым внутренним сопротивлением (L_B, R_B). К источнику подключен силовой трансформатор ($T1$) тяговой подстанции. Силовой трансформатор через контактную сеть (L_K, R_K) питает трансформатор электровоза ($T2$) переменного тока. Через трансформатор электровоза питается каскад выпрямителей ($VD1-4$) и нагрузка в виде двигателя постоянного тока (M). Также к источнику подключена линия с распределенными параметрами (R, L, G, B), которая питает потребителя с линейной нагрузкой (L_H, R_H).

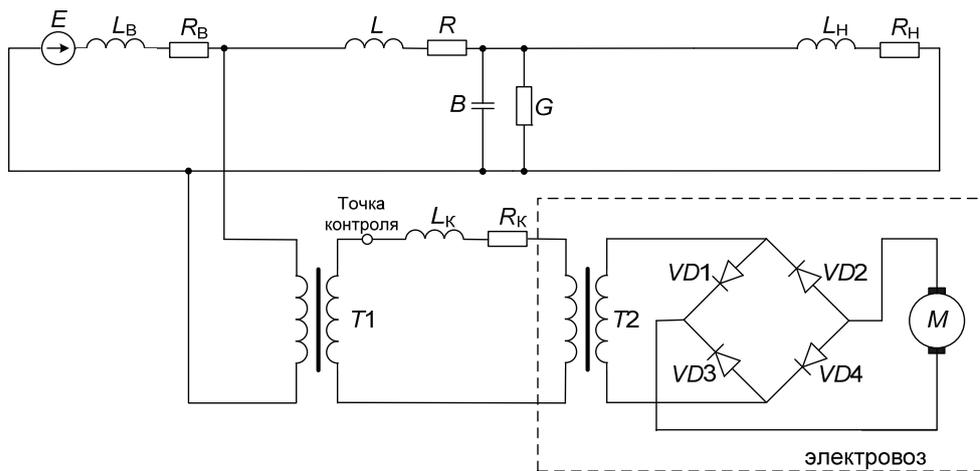


Рис. 2. Схема замещения системы электроснабжения

Для анализа процессов, происходящих в данной системе электроснабжения, в соответствии со схемой замещения, авторами разработана модель в среде MATLAB (рис. 3).

В модели E – источник напряжения; Z_B – внутреннее сопротивление источника; $T_{П}$ – трансформатор тяговой подстанции переменного тока; T_1 и T_2 – силовые трансформаторы электровозов,двигающихся по разным путям двухпутного участка железной дороги; Z_{35} – сопротивление потребителя, подключенного на напряжение 35 кВ; Z_1 и Z_2 – сопротивления участков контактной сети от тяговой подстанции до электровозов,двигающихся соответственно по

первому и второму пути двухпутного участка; $D1-D8$ – диоды мостовых схем электровозов переменного тока; K_1 и K_2 – ключи, определяющие моменты прохождения электровозов вблизи тяговой подстанции, соответственно для первого и второго путей двухпутного участка; RL – линия с распределенными параметрами; Z_H – сопротивление нагрузки, подключенной к длинной линии; M_1 и M_2 – первые двигатели постоянного тока каскадов двигателей электровозов (в модели по 8 двигателей для каждого электровоза).

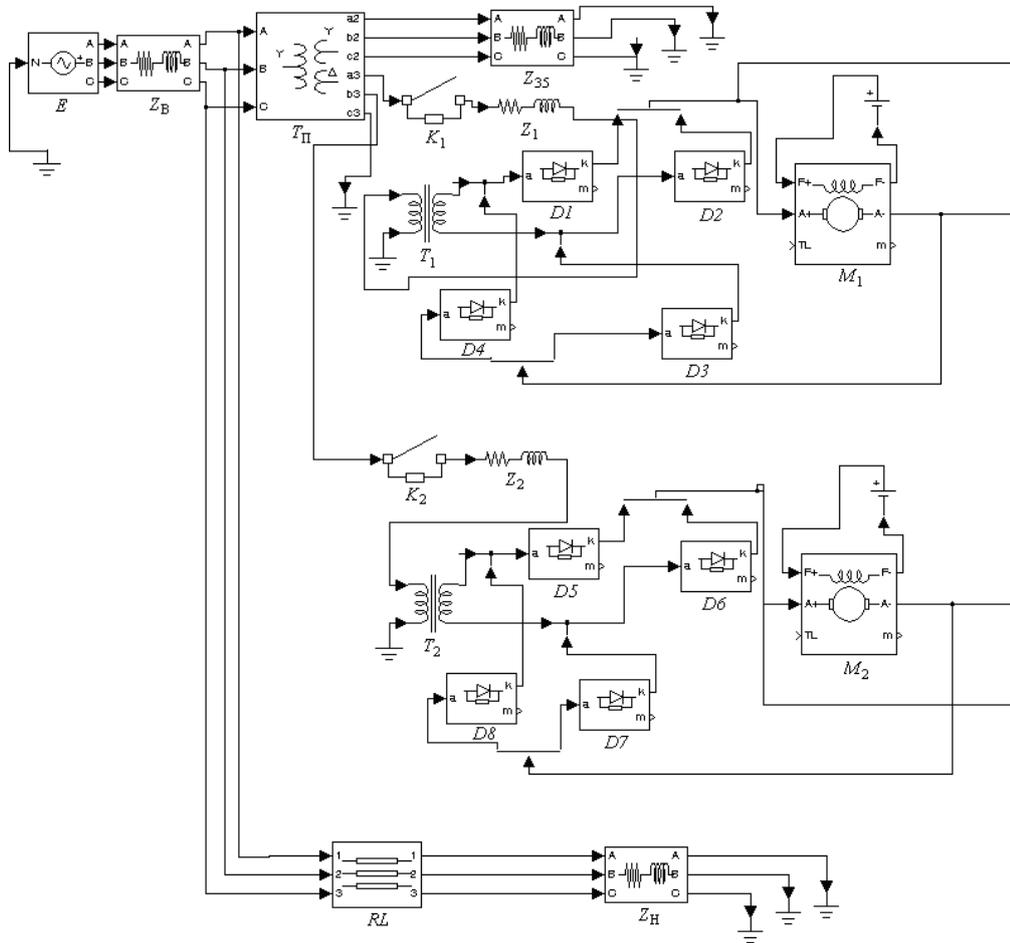


Рис. 3. Модель в среде MATLAB

Параметры элементов модели определены путем вычисления их по паспортным значениям параметров электроустановок, используемых в реальных системах электроснабжения [1]. Параметры сопротивлений Z_B , Z_{35} , Z_H определены исходя из режима ночных минимумов нагрузки, когда из-за снижения нагрузки увеличивается напряжение на ней.

Рассмотрим случай, когда интервал времени между моментами включения ключей K_1 и K_2 минимален. Таким образом, получаем наиболее тяжелый режим с точки зрения гармонических искажений. Спектральная характеристика напряжения, построенная по результатам моделирования для данного случая, представлена на рис. 4.

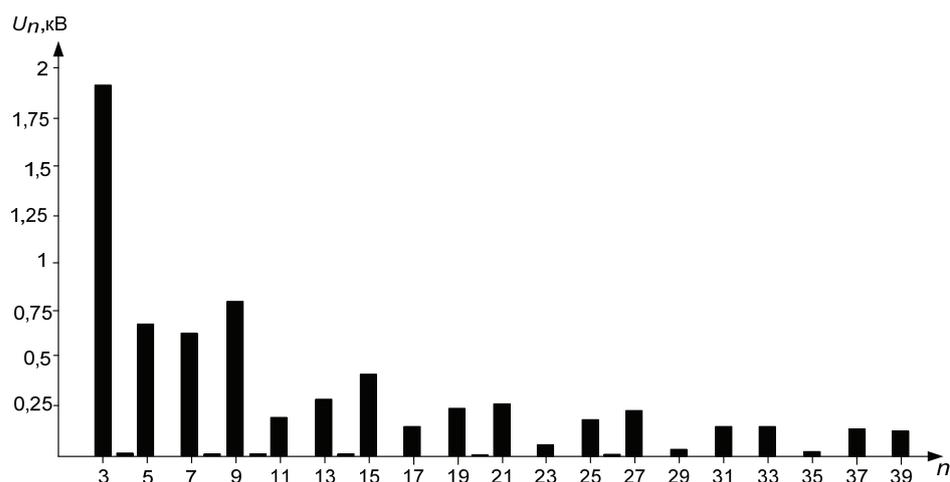


Рис. 4. Гармонический состав напряжения 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока по результатам моделирования

2. Измерение гармонического состава напряжения на тяге переменного тока в реальных условиях

Результаты исследований получены как моделированием, так и измерением показателей качества электрической энергии в реальных условиях.

Измерения проводились по методике в соответствии с ГОСТ Р 53333–2008. В качестве контрольной точки выбрана вторая обмотка напряжением 27,5 кВ силового трансформатора тяговой подстанции (рис. 2). Спектральная характеристика напряжения, построенная по результатам измерений, представлена на рис. 5.

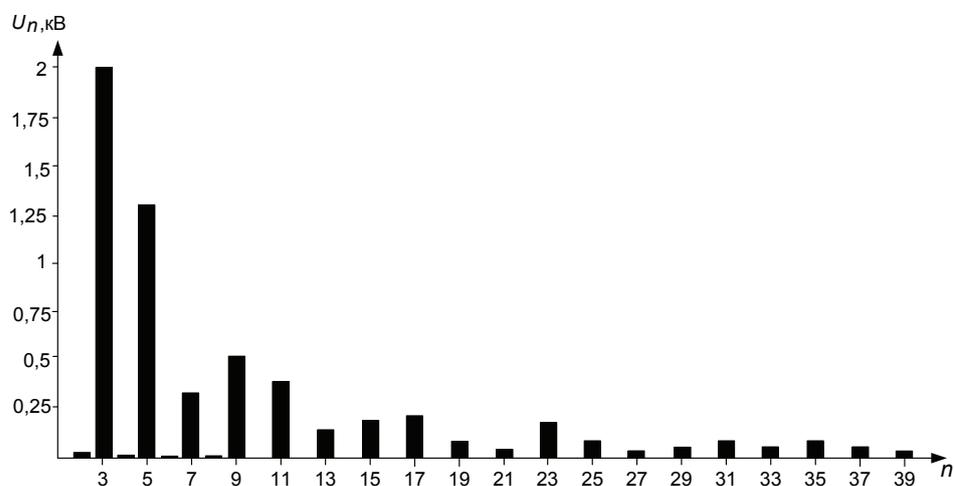


Рис. 5. Гармонический состав напряжения 27,5 кВ тяговой подстанции переменного тока по данным измерений

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, полученный по результатам измерений в реальных условиях, составляет 9,17 %. Тот же коэффициент, полученный путем моделирования системы, равен 9,08 %.

ким образом, сравнение результатов измерений и моделирования показывает, что расхождение коэффициента искажения синусоидальности находится в пределах 10 %. Это доказывает то, что для анализа показателей качества электроэнергии в данном случае можно использовать математические модели.

Подтверждением негативного влияния тяговой подстанции на гармонический состав напряжения является корреляция часового графика активной мощности (P , кВт) и коэффициента искажения синусоидальности (K_U , %) (рис. 5), полученных по результатам реальных измерений.

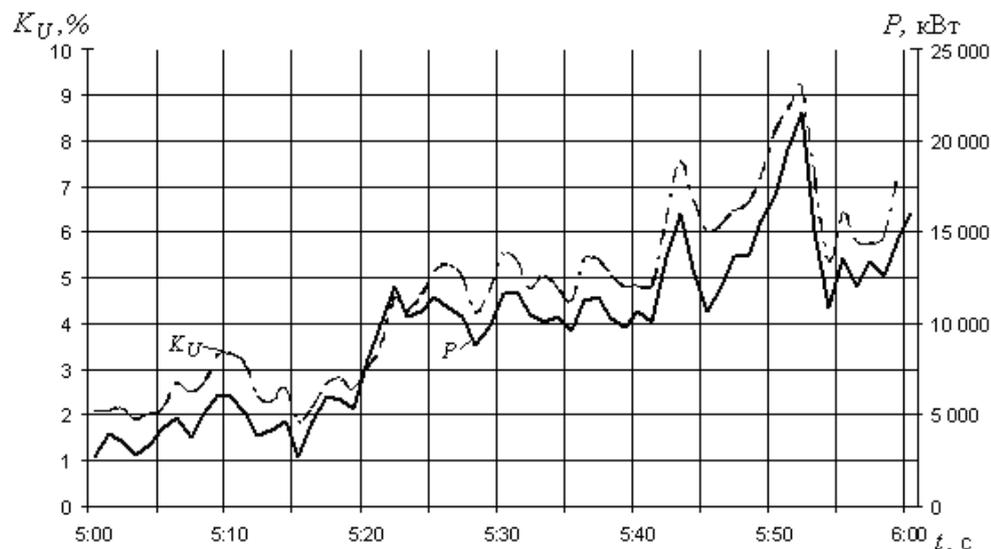


Рис. 6. Кривые мощности потребляемой нагрузки в точке контроля и коэффициента искажения синусоидальности напряжения для $t = 1$ ч

Таким образом, нелинейная нагрузка является источником высших гармоник, величины которых могут значительно исказить форму кривой напряжения.

Проследим изменение гармонического состава напряжения от источника искажений к сети электроснабжения. Ток первичной обмотки трансформатора изменяется по несинусоидальному закону.

3. Математическое описание перехода гармонических искажений через силовой трансформатор

Математическое описание процесса появления гармоник в первичной обмотке трансформатора представлено ниже. Для начала представим ток i_2 вторичной обмотки в виде суммы гармонических составляющих:

$$i_2 = \sum I_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k),$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – номер гармонической составляющей; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота (f – частота переменного тока); φ_k – угол начального сдвига k -й гармонической составляющей.

Магнитный поток сердечника трансформатора будет определяться мгновенным значением тока и, таким образом, может рассматриваться в

форме суммы гармонических составляющих [2]. Тогда суммарный магнитный поток равен

$$\Phi = \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k).$$

Суммарная величина противоЭДС первичной обмотки:

$$e'_1 = -w_1 \sum_k \frac{d\Phi_k}{dt} = -w_1 \sum_k k\omega \Phi_{mk} \cos(k\omega t + \varphi_k),$$

где w_1 – число витков первичной обмотки трансформатора.

По второму закону Кирхгофа получим:

$$u'_1 = -e'_1 = w_1 \sum_k k\omega \Phi_{mk} \cos(k\omega t + \varphi_k).$$

Тогда ток в первичной обмотке, создаваемый высшими гармониками, будет равен

$$i_{1k} = w_1 \sum_k \frac{k\omega \Phi_{mk}}{k\omega L_1} \cos(k\omega t + \varphi_k - \pi/2) = \sum_k I_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k),$$

где L_1 – индуктивность первичной обмотки трансформатора.

Таким образом, гармонические составляющие тока вторичной обмотки трансформатора искажают синусный закон изменения тока и напряжения первичной обмотки.

Трансформатор подключен к сети, которая может быть представлена в форме источника ЭДС с реальным внутренним сопротивлением, поэтому напряжение на выходе этого источника будет равно разности синусоидальной ЭДС и падения напряжения на внутреннем сопротивлении, равном произведению «несинусоидального» периодического тока на внутреннее сопротивление:

$$u_1 = e_1 - i_{1k} z_B,$$

где z_B – внутреннее сопротивление эквивалентного источника.

Таким образом, напряжение сети в точке подключения потребителя будет содержать гармонические составляющие.

4. Влияние на гармонический состав потребителя, подключенного к длинной линии электропередачи

Исследуем влияние потребителя с нелинейной нагрузкой (П2) на качество электрической энергии на зажимах потребителя с линейной нагрузкой (П1), подключенного к энергосистеме через длинную ВЛ.

Результатом моделирования в среде MATLAB стала осциллограмма напряжения на конце ВЛ и соответственно на зажимах потребителя с линейной нагрузкой (П1) (рис. 7).

Спектральная характеристика имеет всплеск на гармонике с порядковым номером 29. Это объясняется наличием эффекта резонанса на данной частоте в конце длинной линии [3].

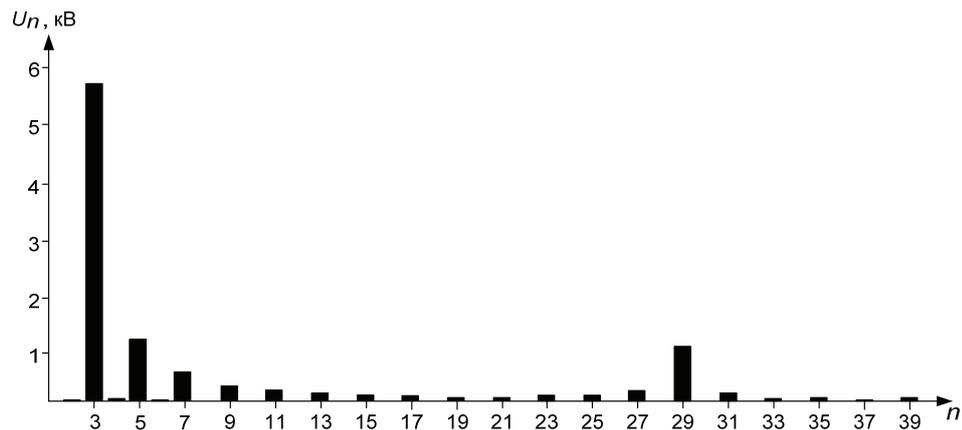


Рис. 7. Гармонический состав напряжения на конце длинной ВЛ 110 кВ

Заключение

В энергосистемах, работающих на нагрузку с нелинейной характеристикой, возникают гармонические составляющие, превышающие нормативные значения по ГОСТ 13109–97 в несколько раз.

В статье на примере работы мощных электровозов железнодорожного транспорта, в которых для работы двигателей используется мостовая схема выпрямления, исследуется проблема низкого качества электрической энергии в других точках единой системы электроснабжения. Высокочастотные гармоники, возникающие в сети, распространяются по ней и могут вызывать аварийные перенапряжения.

Поэтому в электроэнергетических системах необходимо предусматривать устройство, способствующее снижению гармонических составляющих напряжения (тока).

Список литературы

1. **Орлов, И. Н.** Электротехнический справочник : в 3 т. Т. 3 : в 2 кн. Кн. 2 / И. Н. Орлов и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 616 с.
2. **Вольдек, А. И.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.
3. **Кузьмин, Д. А.** Исследование влияния высокочастотных гармоник на уровень перенапряжения в высоковольтной линии электропередачи / Д. А. Кузьмин // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах : Международная научно-практическая конференция МК–1.40. – М., 2010. – С. 45–48.

Кузьмин Дмитрий Алексеевич
аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: 2005dim@rambler.ru

Kuzmin Dmitry Alekseevich
Postgraduate student,
Penza State University

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
автоматизированных
электроэнергетических систем,
Пензенский государственный
университет

E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Goryachev Vladimir Yakovlevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of automated
electropower systems, Penza
State University

УДК 621.317.353.018.3

Кузьмин, Д. А.

Исследование качества электрической энергии при наличии потребителей с нелинейными нагрузками / Д. А. Кузьмин, В. Я. Горячев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 148–155.

МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОГО КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНТРОЛЛЕРАХ

Аннотация. Предложен универсальный способ реализации компенсатора типовыми звеньями промышленных контроллеров за счет их последовательного соединения. Рассмотрено влияние вида передаточной функции возмущающего воздействия на переходный процесс.

Ключевые слова: технология, управление, компенсатор.

Abstract. The article introduces a universal method of compensator implementation by means of standard elements of industrial controllers connected in series. The authors also consider the influence of perturbation action transfer function type on the transient process.

Key words: technology, control, compensation.

Введение

При автоматическом управлении технологическими объектами, когда требуется точное поддержание регулируемой величины на заданном значении, используются схемы управления с компенсацией возмущений [1] (рис. 1). Компенсирующее устройство, обеспечивающее абсолютную инвариантность, должно иметь передаточную функцию

$$W_k(s) = \frac{W_b(s)}{W_o(s)}, \quad (1)$$

где $W_b(s)$ – передаточная функция по каналу возмущения; $W_o(s)$ – передаточная функция канала регулирования.

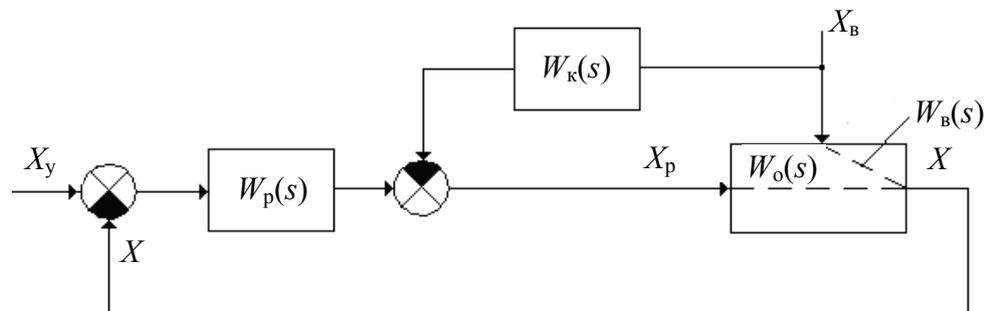


Рис. 1. Структурная схема управления с компенсацией возмущений
 X – регулируемая величина; X_y – управляющее воздействие (задание);
 X_p – регулирующее воздействие; X_b – возмущающее воздействие;
 $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_k(s)$ – передаточная функция компенсатора

Проблема заключается в том, что компенсирующее устройство с такой передаточной функцией нельзя реализовать в явном виде на промышленных

контроллерах, так как в библиотеках алгоритмов имеются, как правило, только алгоритмы, реализующие динамику стандартных звеньев управления.

Предлагается решение проблемы разложением числителя и знаменателя передаточной функции (1) таким образом, чтобы их можно было реализовать последовательным соединением апериодических звеньев первого порядка. Таким образом, появляется возможность добиться абсолютной инвариантности при технической реализации схем с компенсацией возмущений практически на любых промышленных контроллерах в процессе управления.

Дополнительно исследуется влияние динамики канала по возмущению на основной регулируемый параметр в замкнутой системе управления, а также насколько эффективно справляются с данными возмущениями стандартные компенсирующие устройства.

1. Модель для анализа возмущений

В качестве объекта (рис. 2) рассмотрим наиболее распространенный класс объектов с самовыравниванием с ПИ регулятором. Возьмем передаточную функцию объекта второго порядка:

$$W_o(s) = \frac{1}{50 \cdot s^2 + 20 \cdot s + 1}. \quad (2)$$

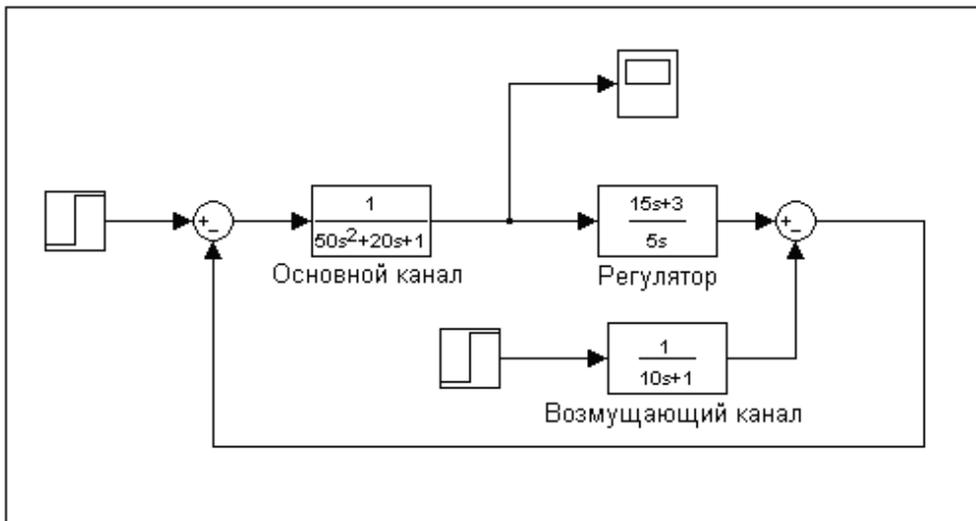


Рис. 2. Модель в MatLab для анализа различных возмущений

Известными методами [2] рассчитаем оптимальные настройки регулятора для данного объекта ($K_p = 3$, $T_i = 5$). Переходный процесс при отсутствии внешнего возмущения при оптимальных настройках регулятора представлен на рис. 3. В результате передаточная функция регулятора будет иметь вид

$$W_p(s) = \frac{15s + 3}{5s}. \quad (3)$$

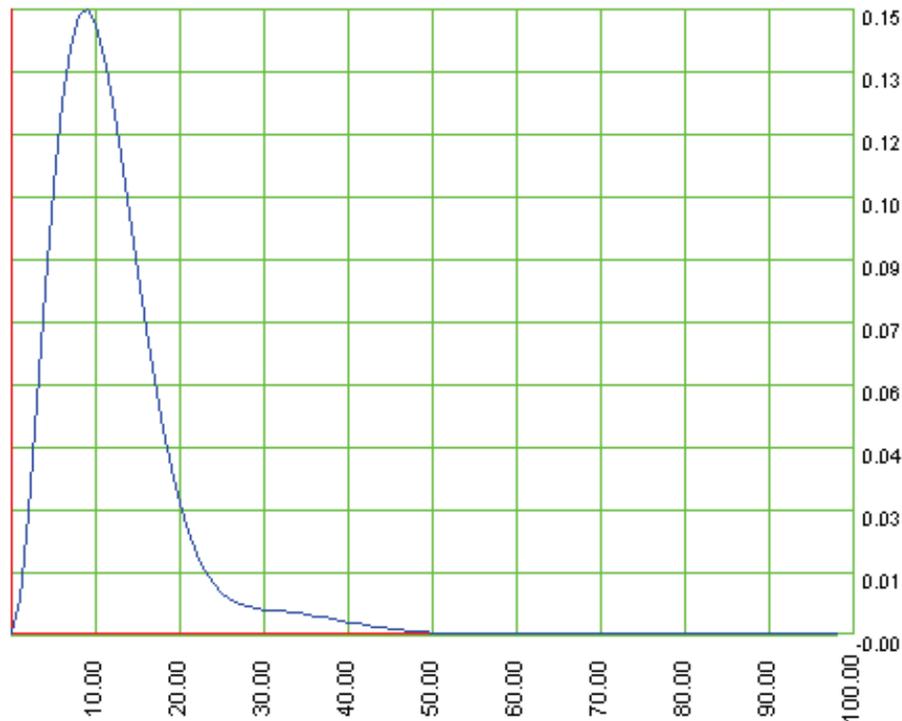


Рис. 3. Переходный процесс при оптимальных настройках регулятора

Теперь будем подавать на объект различные внешние возмущающие воздействия. Рассмотрим следующие варианты.

1. Инерционность канала по возмущению меньше инерционности основного канала. Порядок передаточной функции канала по возмущению меньше порядка передаточной функции основного канала:

$$W_B(s) = \frac{1}{10s + 1}. \quad (4)$$

2. Инерционность канала по возмущению больше инерционности основного канала. Порядок передаточной функции канала по возмущению больше порядка передаточной функции основного канала:

$$W_B(s) = \frac{1}{100s^3 + 50s^2 + 20s + 1}. \quad (5)$$

Сравнивая полученные результаты моделирования (рис. 4) с переходным процессом при отсутствии возмущения (график 1), можно сделать следующие выводы. Инерционность и порядок передаточной функции канала по возмущению незначительно влияют на переходный процесс, и регулятор с ними практически справляется. Уменьшение инерционности (график 2) незначительно увеличивает время регулирования. Увеличение инерционности (график 3) приводит к увеличению динамической ошибки, а также заметно снижается устойчивость переходного процесса. Здесь в отдельных случаях может потребоваться компенсация возмущения.

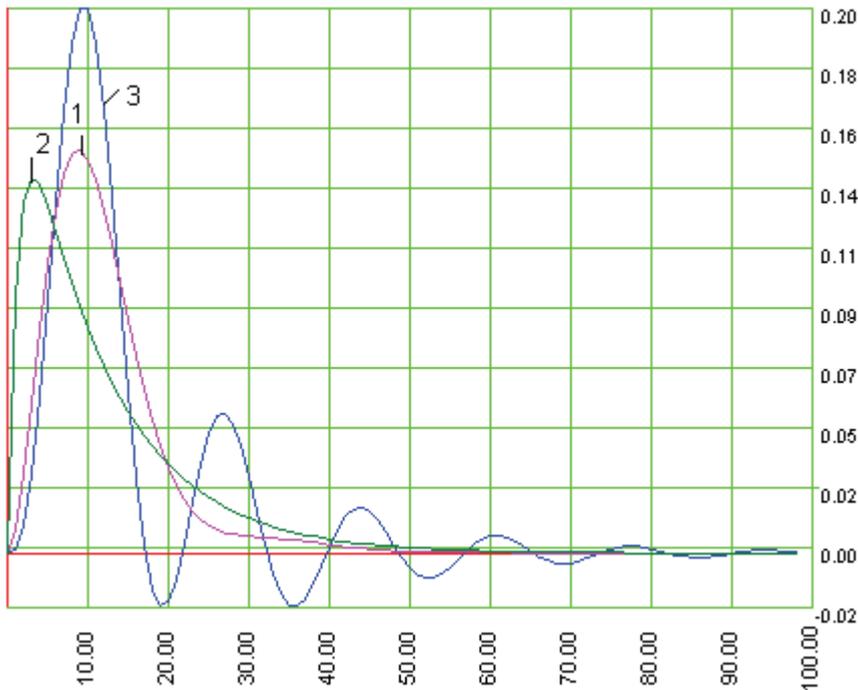


Рис. 4. Графики переходных процессов при различной инерционности возмущающих воздействий

2. Влияние коэффициента передачи возмущающего воздействия

Рассмотрим влияние возмущающего воздействия с передаточной функцией

$$W_B(s) = \frac{1,5}{100s^3 + 50s^2 + 20s + 1} \quad (6)$$

при коэффициентах передачи 0; 1,5 и 2.

В результате моделирования получим переходные процессы, приведенные на рис. 5.

Незначительное увеличение коэффициента передачи по возмущающему каналу (особенно в тех случаях, когда инерционность возмущающего канала больше инерционности объекта) существенно влияет на переходный процесс. В отдельных случаях, когда регулятор не справляется с возмущающим воздействием (график 2), это приводит к неустойчивому переходному процессу. При этом возникает необходимость компенсации возмущения.

3. Моделирование различных компенсирующих устройств

Создадим модель, позволяющую исследовать компенсирующие устройства с различной структурой (рис. 6). В. Я. Ротач [1] дает следующие рекомендации по выбору компенсирующих устройств:

– если система работает со статической ошибкой, т.е. для регулирования системы используется П-регулятор, то в качестве компенсирующего устройства выбирается либо усилительное звено, либо интегродифференцирующее звено;

– если в системе регулирования используется регулятор, содержащий в законе регулирования интегральную составляющую, то в качестве компенсатора выбирают реальное дифференцирующее звено.

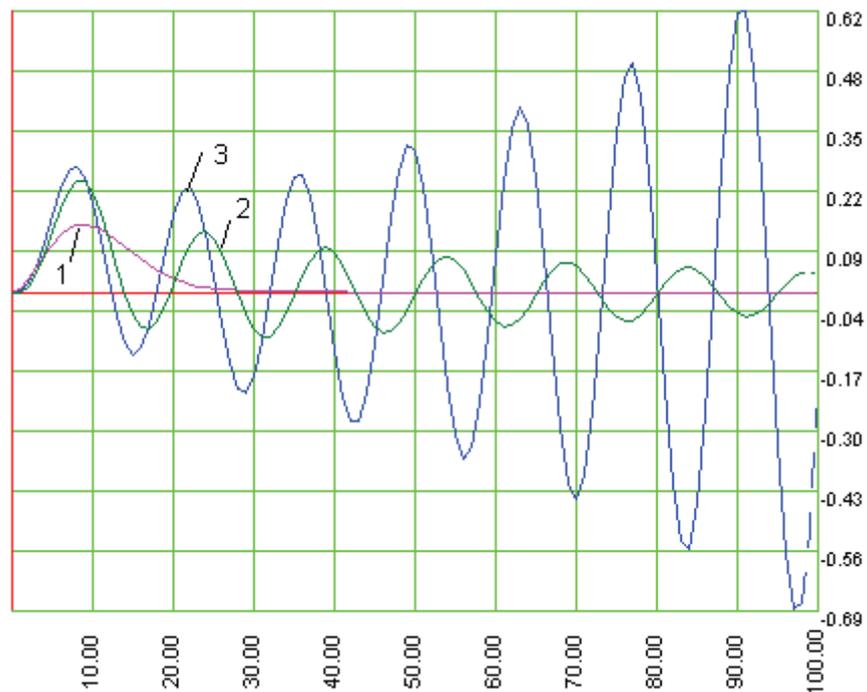


Рис. 5. Графики переходных процессов при различном коэффициенте передачи возмущающих воздействиях: 1 – $k = 0$, 2 – $k = 1,5$, 3 – $k = 2$

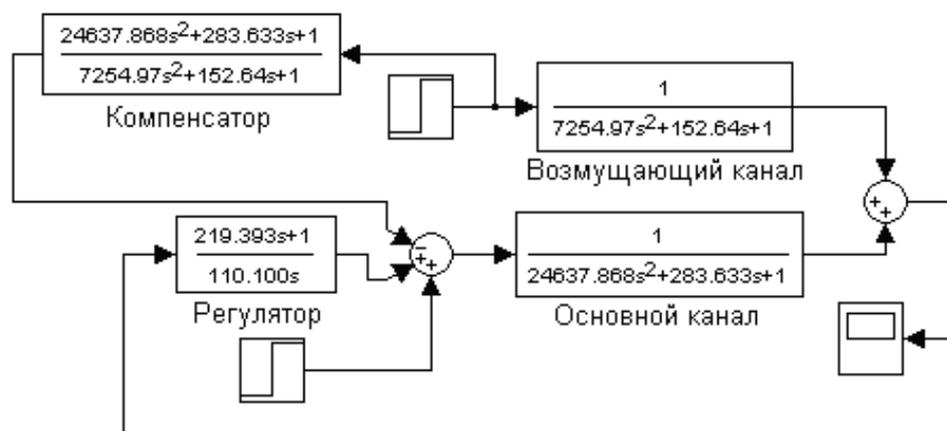


Рис. 6. Модель в MatLab с компенсацией возмущений

Возьмем следующие передаточные функции, полученные в результате исследования конкретного химико-технологического объекта. Передаточная функция объекта:

$$W_o(s) = \frac{1}{24637,868 \cdot s^2 + 283,633 \cdot s + 1};$$

передаточная функция возмущающего канала:

$$W_B(s) = \frac{1}{7254,97 \cdot s^2 + 152,64 \cdot s + 1}.$$

При использовании компенсатора в виде реального дифференцирующего звена с оптимальными настройками получим переходный процесс, представленный на рис. 7. Использование компенсатора с передаточной функцией, обеспечивающей условие абсолютной инвариантности (рис. 6), приводит к тому, что сигнал на выходе объекта практически остается равным нулю при любом виде возмущающего воздействия (погрешность составляет 10^{-16}). Использование стандартного компенсирующего устройства значительно улучшает переходный процесс, но, тем не менее, присутствие динамической ошибки имеет место (рис. 7).

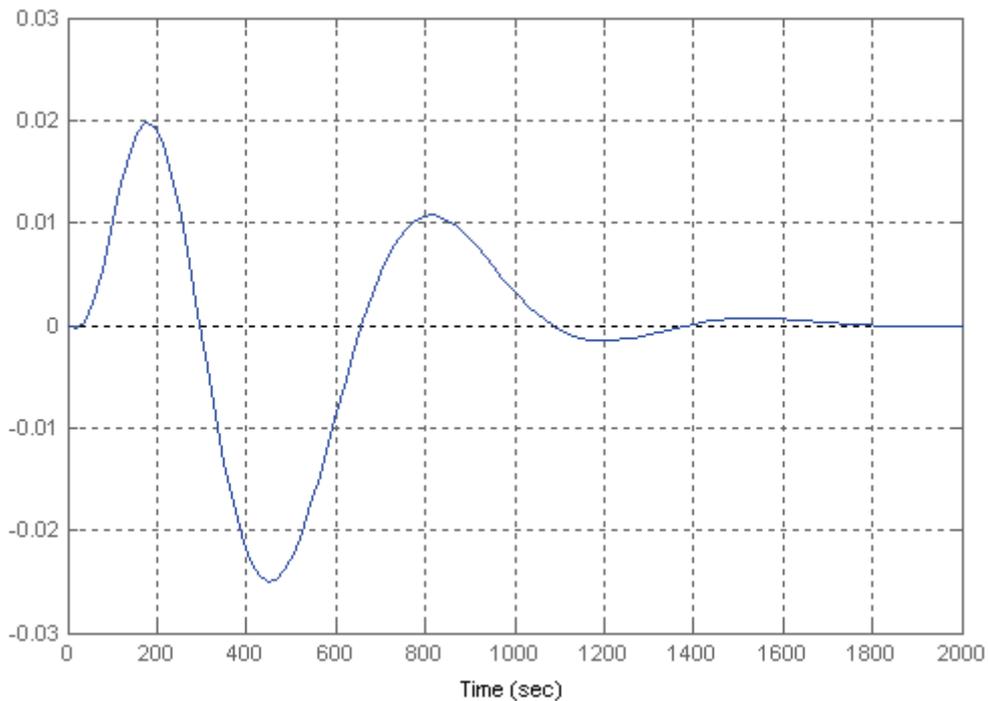


Рис. 7. Переходный процесс при использовании стандартного компенсатора в виде реального дифференцирующего звена (компенсация на резонансной частоте)

4. Расчет компенсирующего устройства

Как было сказано ранее, чтобы реализовать передаточную функцию идеального компенсатора на промышленных контроллерах, ее нужно преобразовать в комбинацию типовых звеньев.

Исходными данными являются:

- массив точек экспериментальной кривой разгона;
- точка перегиба, полученная по методу касательной;
- запаздывающий аргумент, полученный по методу касательной.

Метод касательной заключается в проведении к S-образной кривой разгона касательной в точке перегиба, которая отсекает на оси времени запаздывающий аргумент (рис. 8).

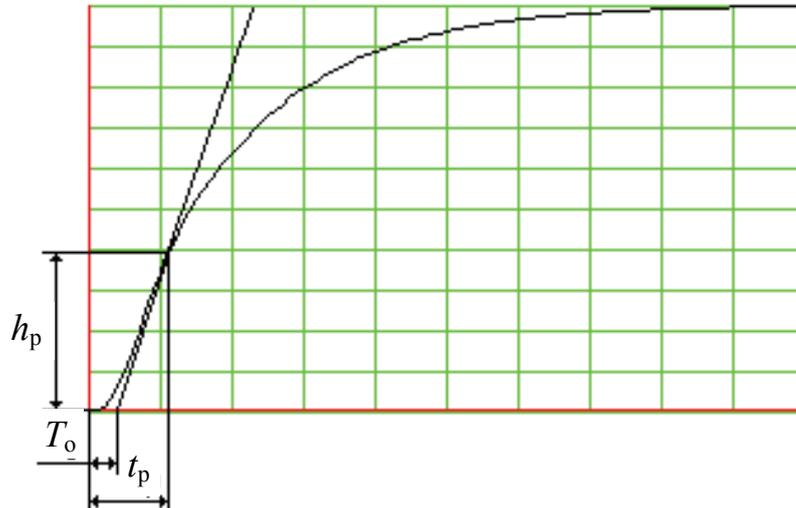


Рис. 8. Графическая интерпретация метода касательной

Разложение числителя и знаменателя передаточной функции n -го порядка производим в программе MathCAD (рис. 9).

Максимальная погрешность аппроксимации: 2,804 % (табл. 1).

Таблица 1

Время, с.	Точки экспериментальной кривой	Точки моделируемой кривой	Погрешность аппроксимации, %
0	0,000	0,000	-0,011
72	0,217	0,245	2,787
144	0,537	0,565	2,804
216	0,768	0,776	0,806
288	0,899	0,892	-0,767
360	0,963	0,950	-1,353
432	0,990	0,977	-1,277
504	0,999	0,990	-0,946
576	1,002	0,996	-0,605
648	1,002	0,998	-0,347
720	1,001	0,999	-0,182

Аналогичным способом разложим знаменатель передаточной функции (MathCAD-документ приведен на рис. 10). Максимальная погрешность аппроксимации 2,726 % (табл. 2).

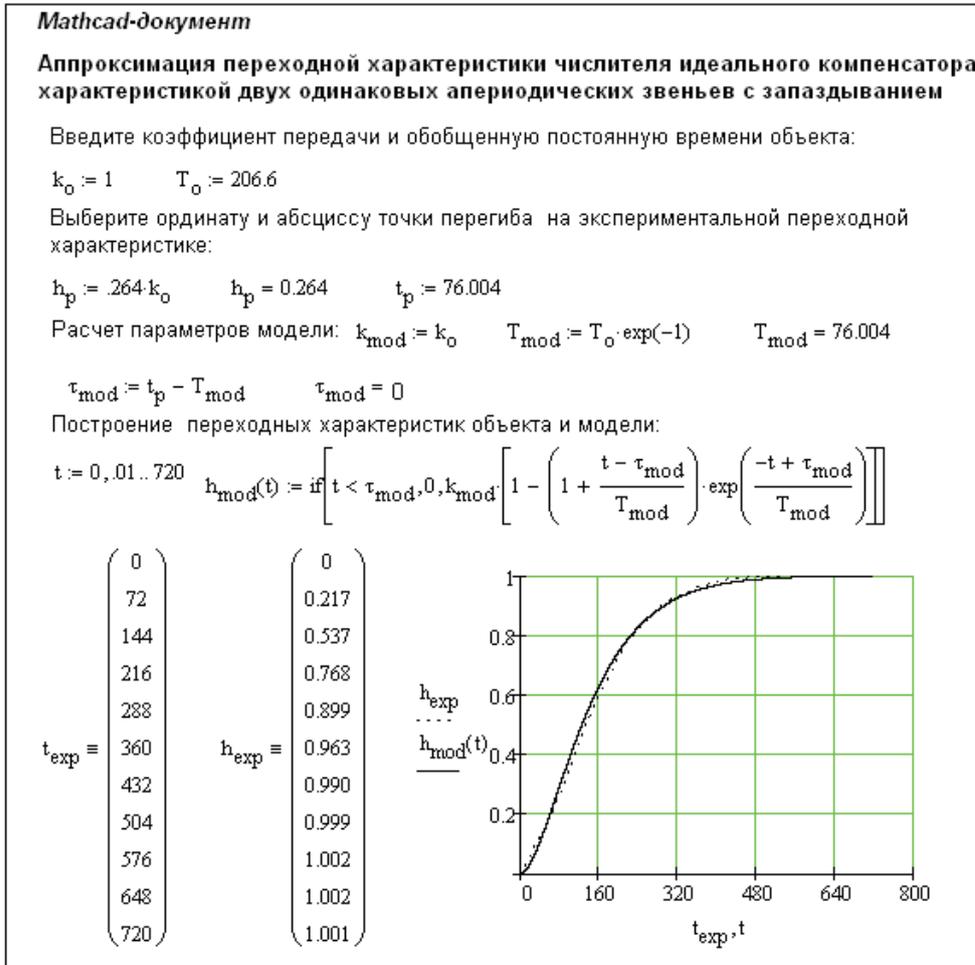


Рис. 9. MathCAD-документ разложения числителя передаточной функции

Таблица 2

Время, с.	Точки экспериментальной кривой	Точки моделируемой кривой	Погрешность аппроксимации, %
0	0,000	0,000	0,000
110	0,162	0,182	2,058
220	0,432	0,459	2,726
330	0,660	0,675	1,521
440	0,815	0,815	0,027
550	0,908	0,899	-0,949
660	0,959	0,946	-1,316
770	0,984	0,972	-1,270
880	0,996	0,985	-1,030
990	1,000	0,993	-0,748
1100	1,001	0,996	-0,501

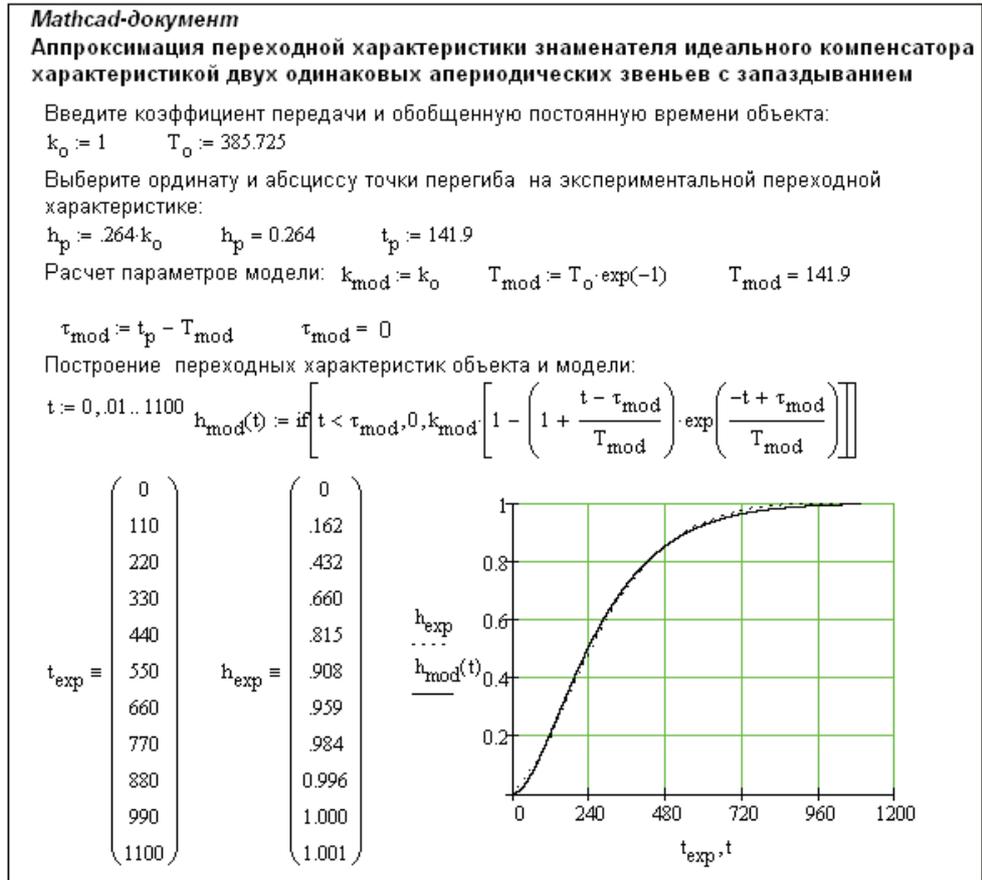


Рис. 10. MathCAD-документ разложения знаменателя

В результате передаточная функция компенсирующего устройства будет иметь вид

$$W_k(s) = \frac{W_b(s)}{W_o(s)} = \frac{(141,9 \cdot s + 1)^2}{(76,004 \cdot s + 1)^2} = \frac{20135,61 \cdot s^2 + 283,8 \cdot s + 1}{5776,608 \cdot s^2 + 152,008 \cdot s + 1} \quad (6)$$

Смоделируем в MatLab компенсирующее устройство из двух последовательно соединенных звеньев (рис. 11).

Изобразим в одной системе координат графики переходных процессов без компенсатора (график 2), с типовым компенсатором (график 1) и с компенсатором, обеспечивающим абсолютную инвариантность (график 3) (рис. 12).

Сведем полученные данные в табл. 3.

Таблица 3

Наличие компенсатора в комбинированной АСР	Переходный процесс по возмущению	
	Динамическая ошибка, %	Время регулирования, с
Без компенсатора	50,3	674
Идеальный компенсатор	$4,5 \cdot 10^{-14}$	0
Компенсатор по полученным настройкам	2,5	0

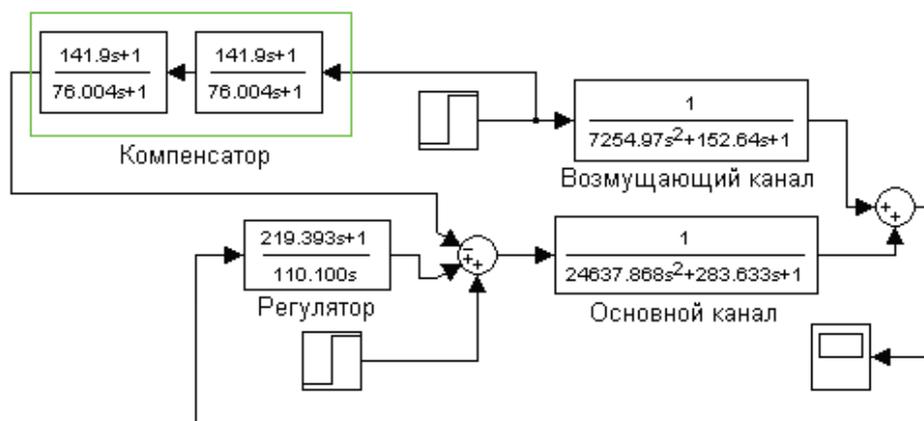


Рис. 11. Модель в MatLab с аппроксимированным компенсатором

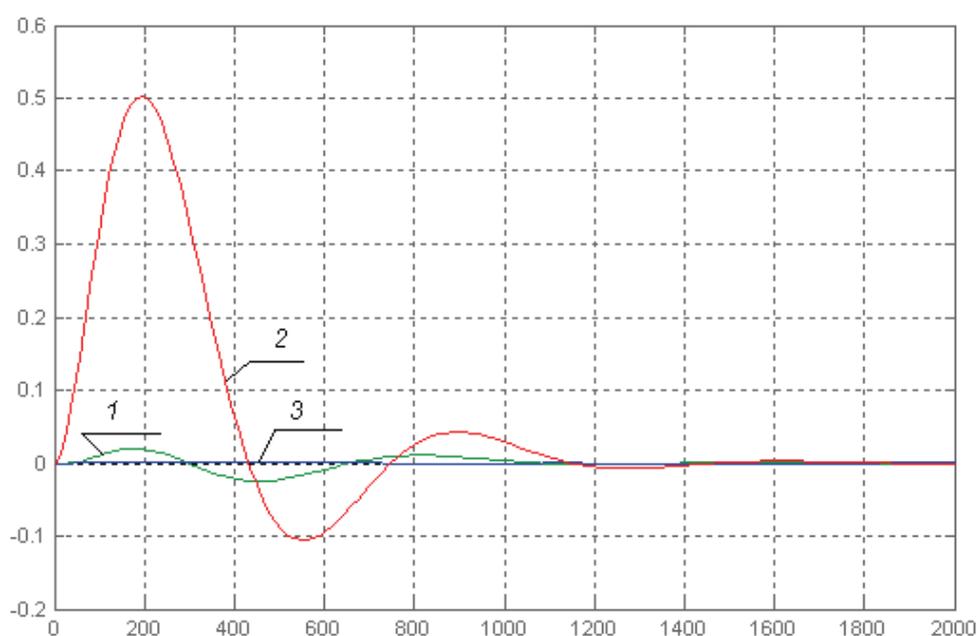


Рис. 12. Сравнение переходных процессов

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующий вывод. Предложенный метод аппроксимации компенсирующих устройств последовательным соединением динамических звеньев более низких порядков, чем числитель и знаменатель передаточной функции идеального компенсирующего устройства, обеспечивает почти абсолютную компенсацию возмущающего воздействия и может быть использован при практической реализации на промышленных контроллерах.

Список литературы

1. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В. Я. Ротач. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.

2. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 656 с.

Бильфельд Николай Валентинович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизации технологических
процессов, Березниковский филиал
Пермского государственного
технического университета

E-mail: bilfeld@mail.ru

Bilfeld Nikolay Valentinovich
Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of technological
processes automation, Berezhikovsky
affiliated branch of Perm State
Technical University

Жукотская Наталья Владимировна
студентка, Березниковский филиал
Пермского государственного
технического университета

E-mail: zxenon@narod.ru

Zhukotskay Natalya Vladimirovna
Student, Berezhikovsky affiliated branch
of Perm State Technical University

УДК 681.51

Бильфельд, Н. В.

Метод реализации эффективного компенсирующего устройства на промышленных контроллерах / Н. В. Бильфельд, Н. В. Жукотская // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 156–166.

М. А. Чиркина, Н. К. Юрков, А. Н. Якимов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ НА МАГНИТНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ

Аннотация. Предложены декомпозиционные математические модели резонансного вентиля и циркулятора на магнитных нанокompозитах. Математические модели построены при помощи автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами и магнитными частицами (строгая модель) и эффективных значений компонентов тензора магнитной и скаляра диэлектрической проницаемостей (упрощенная модель). Наблюдается хорошее совпадение результатов моделирования, полученных при помощи строгой и упрощенной моделей.

Ключевые слова: математические модели, магнитные нанокompозиты, автономные блоки, магнитный резонанс, прохождение и отражение волн, резонансный вентиль, циркулятор.

Abstract. The authors suggest decomposition mathematical models of resonance valve and circulator on magnetic nanocomposites. The mathematical models are constructed using the autonomous units of rectangular parallelepiped shape with dielectric nanospheres and magnetic particles (rigorous model) and applying effective values of components of the magnetic and scalar permittivity (simplified model). There is a good agreement between the simulation results obtained using rigorous and simplified models.

Key words: mathematical models, magnetic nanocomposites, self-contained units, magnetic resonance, transmission and reflection of waves, resonance switch, circulator.

Введение

Анализ устройств сверхвысоких частот с магнитными нанокompозитами проводился при помощи пакета прикладных программ, реализующего решение прикладных задач электродинамики методом автономных блоков [1]. Автономный блок в виде прямоугольного параллелепипеда с диэлектрическими наносферами, магнитными наночастицами и виртуальными каналами Флоке на гранях [2] был включен в библиотеку пакета прикладных программ и использовался как базовый элемент для построения устройств на магнитных нанокompозитах.

1. Математическая модель резонансного вентиля

На рис. 1 показан прямоугольный волновод с антипараллельно намагниченными нанокompозитами с внешним магнитным полем H_0 вблизи ферромагнитного резонанса (резонансный вентиль). Строгая математическая модель прямоугольного волновода с антипараллельно намагниченными магнитными нанокompозитами строилась следующим образом. Область прямоугольного волновода между входными сечениями S_1 и S_2 расчленилась на пять автономных блоков (рис. 1,в). Для блоков 2, 3 магнитных нанокompозитов использовалась вторичная декомпозиция. Они дополнительно расчленились на автономные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами и магнитными частицами [2].

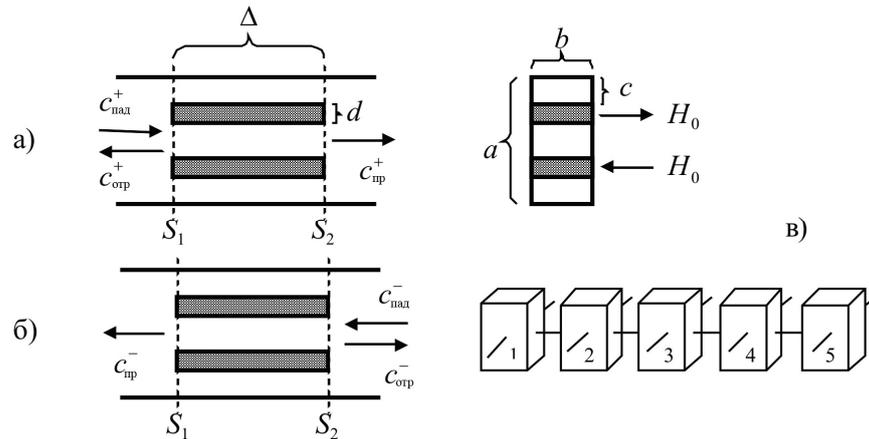


Рис. 1. Резонансный вентиль на антипараллельно намагниченных магнитных нанокompозитах: $a = 7,2$ мм, $b = 3,6$ мм, $c = 1,5$ мм, $d = 1,0$ мм; Δ – длина нанокompозита; $c_{пад}^+$, $c_{отр}^+$ – амплитуды падающих волн; $c_{пр}^+$ – амплитуды отраженных волн; $c_{пр}^+$, $c_{отр}^+$ – амплитуды прошедших волн; H_0 – напряженность внешнего магнитного поля; а, б – взаимно противоположные направления распространения волны типа H_{10} в волноводе; в – декомпозиционная схема (1, 3, 5 – автономные блоки с виртуальными каналами Флоке [3]; 2, 4 – автономные блоки магнитных нанокompозитов)

В результате рекомпозиции автономных блоков и преобразования их матриц были получены дескрипторы автономных блоков нанокompозитов в базисе собственных волн каналов Флоке. Затем осуществляется рекомпозиция блоков 1–5 (рис. 1, в) и преобразование матриц проводимости, записанных в базисе собственных волн каналов Флоке, к базису, записанному в собственных волнах прямоугольного волновода. На заключительном этапе моделирования матрица проводимости резонансного вентиля преобразуется в матрицу рассеяния.

Упрощенная математическая модель резонансного вентиля построена с использованием эффективных значений компонентов тензора магнитной и диэлектрической проницаемостей магнитных нанокompозитов [2]. Здесь также использовался декомпозиционный подход (рис. 1, в). Дескрипторы автономных блоков 2, 4 магнитных нанокompозитов были получены методом минимальных автономных блоков [4].

На рис. 2 приведены результаты математического расчета зависимостей модулей амплитуд отраженных и прошедших волн в прямом и обратном направлениях распространения волны H_{10} от напряженности внешнего магнитного поля H_0 . Вблизи ферромагнитного резонанса прямая волна («+») прямоугольного волновода H_0 практически без затухания ($|c_{пр}^+| \approx 0,95$) проходит через систему антипараллельно намагниченных магнитных нанокompозитов. Обратная волна («-») прямоугольного волновода H_0 имеет значительные затухания при прохождении через систему намагниченных магнитных нанокompозитов. В точке ферромагнитного резонанса $|c_{пр}^-| \approx 0,015$, что

составляет 35 дБ. Резонансный вентиль на основе магнитных нанокompозитов имеет для обратной волны затухание на 5–7 дБ больше по сравнению с вентилем на основе феррита.

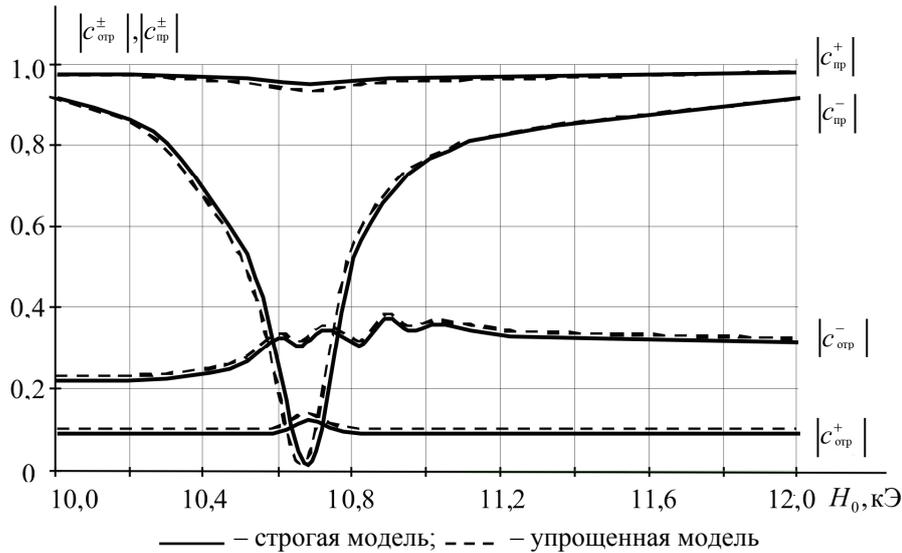


Рис. 2. Дифракция волны H_{10} на антипараллельно намагниченных магнитных нанокompозитах вблизи ферромагнитного резонанса: $f = 30$ ГГц, $\Delta = 7,2$ мм

2. Математическая модель циркулятора

На рис. 3 показана конструкция циркулятора, состоящая из двух направленных ответвителей (щелевые мосты), производящих деление передаваемой электромагнитной энергии пополам, антипараллельно намагниченных магнитных нанокompозитов одном канале и диэлектрических вставок в другом канале. Циркулятор обеспечивает передачу электромагнитной энергии из канала 1 в канал 2, из 2 – в 3, из 3 – в 4, из 4 – в 1.

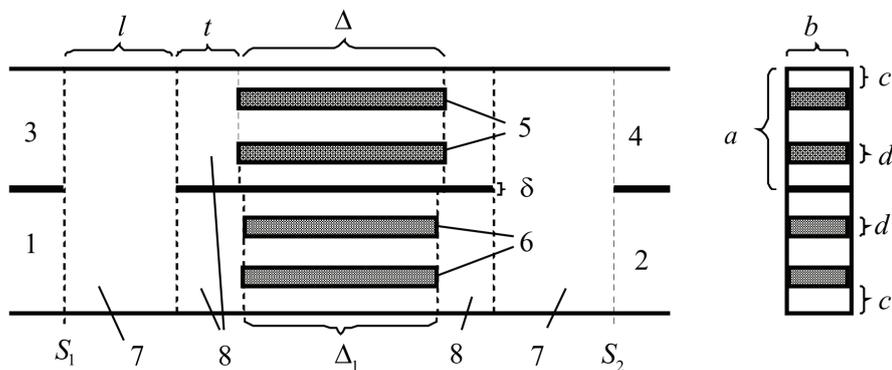


Рис. 3. Волноводный циркулятор на магнитных нанокompозитах: $a = 3,6$ мм, $b = 7,2$ мм, $c = 1,5$ мм, $d = 1,0$ мм, $\Delta = 14,4$ мм, $\Delta_1 = 13,8$ мм, $t = 5,0$ мм, $l = 24,5$ мм, $\delta = 0,1$ мм; 1, 2, 3, 4 – плечи циркулятора; 5 – магнитные нанокompозиты; 6 – диэлектрические вставки ($\epsilon = 5$, $\mu = 1$); 7 – направленные ответвители; 8 – отрезки прямоугольного волновода

Математическая модель циркулятора была построена с использованием декомпозиционного подхода. Область циркулятора между сечениями S_1 и S_2 расчленилась условными границами (штриховые вертикальные прямые на рис. 3) на два направленных ответвителя (7), четыре отрезка прямоугольного волновода (8), отрезок волновода с антипараллельно намагниченными магнитными нанокompозитами (5), отрезок волновода с диэлектрическими вставками (6). Математические модели направленных ответвителей и отрезков прямоугольного волновода были построены при помощи автономных многомодовых блоков [5]. Строгая и упрощенная математические модели отрезка волновода с антипараллельно намагниченными магнитными нанокompозитами построены так же, как и для резонансного вентиля. Математическая модель отрезка волновода с диэлектрическими вставками была построена при помощи автономных блоков с виртуальными каналами Флоке [4].

Длина щели l направленных ответвителей (7) циркулятора (рис. 3) должна быть такой, чтобы передаваемая электромагнитная энергия делилась пополам. На рис. 4 показаны результаты математического расчета коэффициента деления $k_{\text{дел}}$ от длины щели. Деление электромагнитной энергии пополам между каналами 2, 4 наблюдается при значении $l/a = 3,4$ ($l = 24,5$ мм). Значение длины щели для направленных ответвителей используем для построения полной математической модели циркулятора.

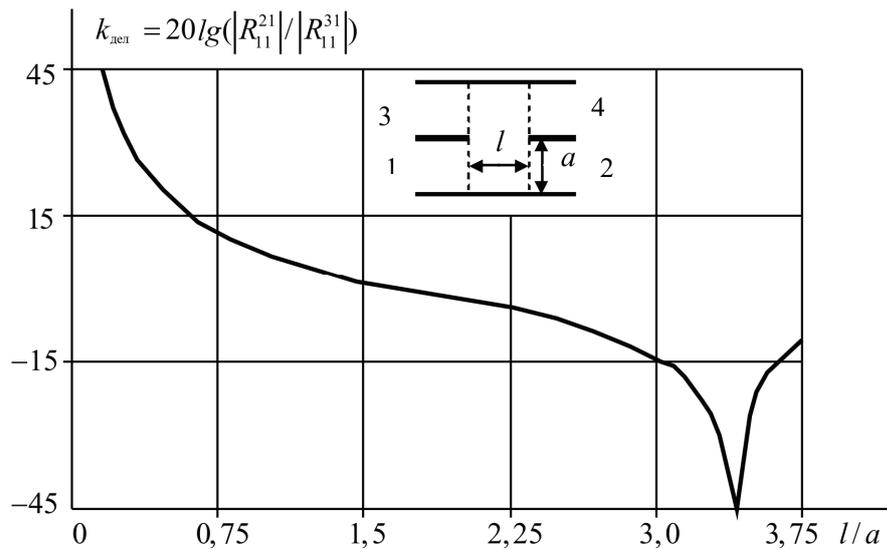


Рис. 4. Зависимость коэффициента деления направленного ответвителя от длины щели: $f = 30$ ГГц; R_{11}^{21} , R_{11}^{41} – элементы матрицы рассеяния ответвителя для волны H_{10}

В канале циркулятора с магнитными нанокompозитами (5) на рис. 3 для одного из направлений распространения волны необходимо создавать фазовый сдвиг $\varphi + \pi$, а для обратного направления – φ . На рис. 5 приведены результаты расчета (строгая математическая модель) зависимостей элементов

матрицы рассеяния $R_{11}^{12} = |R_{11}^{12}| \exp(i\varphi^{12})$, $R_{11}^{21} = |R_{11}^{21}| \exp(i\varphi^{21})$ отрезка прямоугольного волновода с антипараллельно намагниченными магнитными нанокompозитами от напряженности внешнего магнитного поля H_0 . При $H_0 = 9,8 \text{ кЭ}$ наблюдается фазовый сдвиг между прямым (φ^{21}) и обратным (φ^{12}) направлениями распространения электромагнитной энергии, равный π . Фазовый сдвиг в канале циркулятора при этом равен $\varphi = \varphi^{21} \Big|_{H_0=9,8 \text{ кЭ}} = 5,88\pi$.

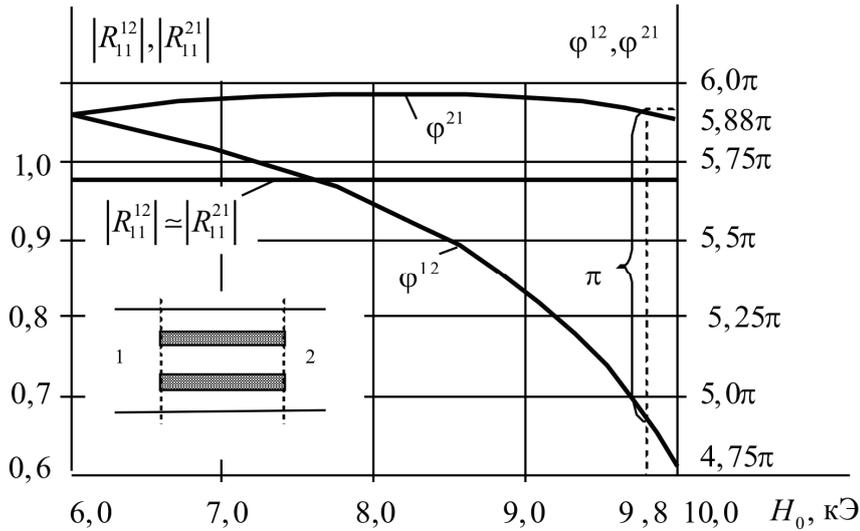


Рис. 5. Зависимость модулей и фаз элементов матрицы рассеяния R_{11}^{12} , R_{11}^{21} отрезка прямоугольного волновода с антипараллельно намагниченными магнитными нанокompозитами от напряженности внешнего магнитного поля H_0 : $f = 30 \text{ ГГц}$

Фазовый сдвиг в канале циркулятора с диэлектрическими вставками (2) на рис. 3 также должен составлять $\varphi = 5,88\pi$.

На рис. 6 приведены результаты математического расчета зависимости фаз элементов матрицы рассеяния $R_{11}^{21} = |R_{11}^{21}| \exp(i\varphi^{21})$, $R_{11}^{12} = |R_{11}^{12}| \exp(i\varphi^{12})$ отрезка прямоугольного волновода с диэлектрическими вставками (6) на рис. 3 от длины Δ_1 . При $\Delta_1 = 13,8 \text{ мм}$ наблюдается совпадение фаз для отрезков волноводов с диэлектрическими вставками и магнитными нанокompозитами ($\Delta = 14,4 \text{ мм}$) для прямого направления распространения волны (φ^{21}).

Результаты исследования математических моделей направленного ответвителя (длина щели для половинного деления энергии равна $l = 24,5 \text{ мм}$), отрезка прямоугольного волновода с антипараллельным намагничиванием магнитных нанокompозитов (разность фаз φ для взаимно обратных направлений распространения энергии обеспечивается при напряженности внешнего магнитного поля, равного $H_0 = 9,8 \text{ кЭ}$), отрезка прямоугольного волновода

с диэлектрическими вставками (фазовый сдвиг в канале циркулятора с диэлектрическими вставками равен фазовому сдвигу $\varphi = 5,88\pi$ в канале с магнитными наноккомпозитами при длине вставок, равной $\Delta_1 = 13,8$ мм) используются для построения общей математической модели циркулятора.

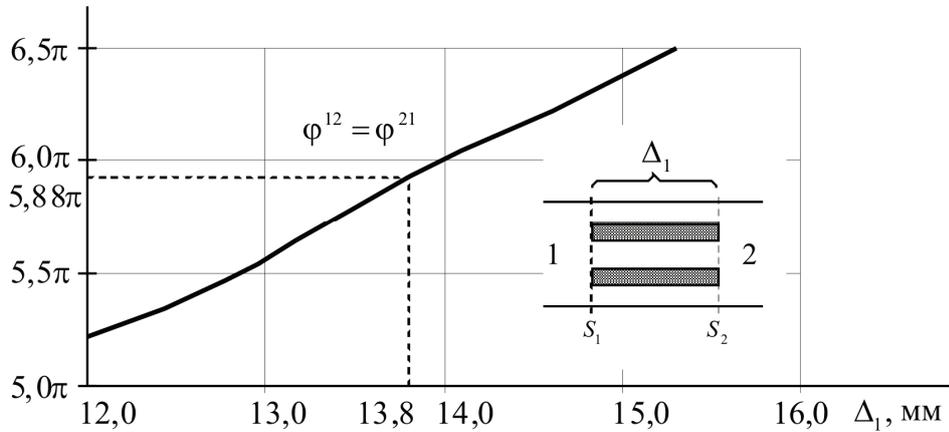


Рис. 6. Зависимость фазы элементов матрицы рассеяния R_{11}^{21} , R_{11}^{12} отрезка прямоугольного волновода с диэлектрическими вставками от их длины: $f = 30$ ГГц, $\epsilon = 5$, $\mu = 1$

На рис. 7 приведены результаты математического расчета распределения электромагнитной энергии по плечам β ($\beta = 1, 2, \dots, 4$) циркулятора при падении в плечо α ($\alpha = 1, 2, \dots, 4$) волны типа H_{10} с амплитудой c_{α}^{+} .

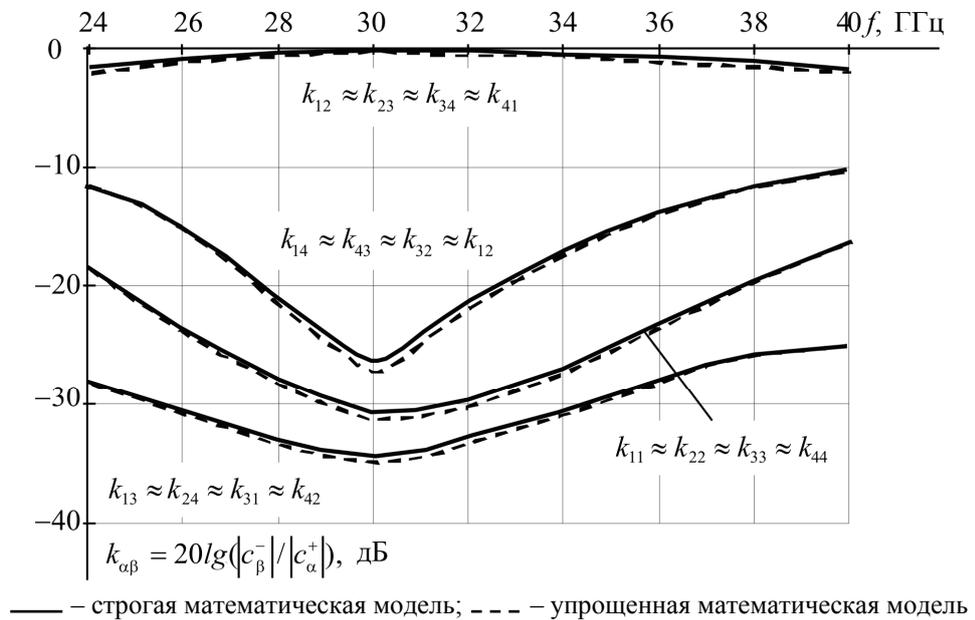


Рис. 7. Зависимость коэффициентов прохождения $k_{\alpha\beta}$ ($\alpha \neq \beta$) и отражения $k_{\alpha\alpha}$ циркулятора от частоты

Наблюдается практически полная передача электромагнитной энергии из плеча 1 в плечо 2, из 2 – в 3, из 3 – в 4, из 4 – в 1. В остальные плечи электромагнитная энергия поступает с достаточно большим затуханием. Качество циркулятора в основном определяется уровнем этого затухания. Для циркуляторов с магнитными нанокompозитами это затухание на 7–10 дБ больше, чем для циркуляторов с ферритами.

Заключение

Наблюдается хорошее совпадение результатов математического моделирования резонансного вентилля и циркулятора, полученных при помощи строгой и упрощенной моделей (рис. 2, 7). На основе этого можно сделать вывод, что при моделировании невзаимных устройств и приборов сверхвысоких частот электромагнитные параметры магнитных нанокompозитов можно, как и ферритов, описывать тензором магнитной проницаемости и скаляром диэлектрической проницаемости.

Список литературы

1. **Голованов, О. А.** Система автоматизированного моделирования устройств СВЧ / О. А. Голованов // Известия вузов. Радиотехника. – 1986. – Т. 29, № 2. – С. 74–78.
2. **Чиркина, М. А.** Математическое моделирование магнитных нанокompозитов на основе опаловых матриц из упаковки диэлектрических наносфер / М. А. Чиркина // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 1. – С. 14–20.
3. **Голованов, О. А.** Автономные блоки с виртуальными каналами Флоке и их применение для решения прикладных задач электродинамики / О. А. Голованов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 12. – С. 1423–1430.
4. **Никольский, В. В.** Метод минимальных автономных блоков и его реализация для волноводных задач дифракции / В. В. Никольский, Т. И. Лаврова // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23, № 2. – С. 987–991.
5. **Никольский, В. В.** Автономные многомодовые блоки и их применение для исследования полосковой линии / В. В. Никольский, О. А. Голованов // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т. 25, № 3. – С. 751–756.

Чиркина Марина Александровна

старший преподаватель, кафедра прикладной математики и информатики, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

E-mail: chm-77@mail.ru

Chirkina Marina Alexandrovna

Senior lecturer, sub-department of applied mathematics and computer science, Penza State University of Architecture and Construction

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет

E-mail: yurkov_nk@mail.ru

Yurkov Nikolay Kondratyevich

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of radio equipment design and production, Penza State University

Якимов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

E-mail: y_alder@mail.ru

Yakimov Alexander Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of radio equipment design
and production, Penza State University

УДК 535.32

Чиркина, М. А.

Математическое моделирование устройств сверхвысоких частот на магнитных нанокompозитах / М. А. Чиркина, Н. К. Юрков, А. Н. Якимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 167–174.

М. К. Самохвалов, М. О. Тахтенкова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ РЕЗИСТОРОМ ЦЕПИ В СХЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ИНДИКАТОРАМИ

Аннотация. Представлены результаты математического анализа переходных процессов в электрических цепях схем управления тонкопленочными электролюминесцентными индикаторами, включающих электролюминесцентный конденсатор и последовательный резистор цепи. Получены аналитические соотношения для напряжения и тока в цепи при возбуждении знакопеременным симметричным импульсным напряжением.

Ключевые слова: математическое моделирование, тонкопленочный электролюминесцентный конденсатор, переходные электрические процессы.

Abstract. The article introduces the results of mathematical analysis of transient processes in electric circuits of control schemes for thin film electroluminescent indicators including electroluminescent capacitor and circuit series resistor. The authors have obtained analytical ratio of voltage and current in the circuit under alternating symmetrical impulse voltage excitation.

Key words: mathematic modeling, thin-film electroluminescent capacitor, transient electrical processes.

Введение

Тонкопленочные электролюминесцентные конденсаторы являются излучающими элементами, входящими в схему управления индикаторными устройствами. Они имеют существенную особенность электрических характеристик: пороговую зависимость электрических и светотехнических параметров от управляющего напряжения. Переходные процессы в таких тонкопленочных полупроводниковых структурах изучены недостаточно. В данной работе представлена математическая модель переходных электрических процессов тонкопленочного электролюминесцентного конденсатора (ТЭЛК) в составе схемы управления при возбуждении знакопеременным импульсным напряжением.

1. Основа математической модели

Математическое моделирование переходных электрических характеристик в ТЭЛК при воздействии импульсного напряжения является актуальным и перспективным. Моделирование электрических характеристик многослойных тонкопленочных структур позволяет изучить работу тонкопленочного конденсатора как элемента электрической цепи, что является необходимым для разработки режимов возбуждения электролюминесценции и схем управления индикаторными устройствами [1].

Полевой механизм образования свободных носителей заряда в слое люминофора в сильном электрическом поле обуславливает высокую скорость протекания электронных процессов в тонкопленочных электролюминесцентных структурах [2]. Как показали экспериментальные исследования, скорость

изменения характеристик электролюминесцентных конденсаторов определяется скоростью изменения внешнего напряжения [3].

Токи в слоях люминофора и диэлектрика электролюминесцентного конденсатора связаны с напряженностью электрического поля. Выражение для тока смещения в люминесцентной и диэлектрических пленках могут быть записаны в следующем виде [4]:

$$I_{LC} = C_L \cdot dU_L / dt, \quad I_{DC} = C_D \cdot dU_D / dt, \quad (1)$$

где C_L и C_D – емкости слоев люминофора и диэлектрика; dU_L / dt и dU_D / dt – скорости изменения напряжения в слоях люминофора и диэлектрика соответственно.

Ток проводимости диэлектрических материалов, используемых в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах, незначителен. Поэтому можно считать, что в диэлектрическом слое протекает только ток смещения. Выражение для полного тока в многослойной структуре может быть записано в следующем виде:

$$I = C_L \cdot dU_L / dt + I_{LA} = C_D \cdot dU_D / dt, \quad (2)$$

где I_{LA} – ток проводимости в слое люминофора.

Поскольку приложенное напряжение распределяется между слоями люминофора и диэлектрика, то скорость изменения напряжения, приложенного к тонкопленочной структуре, складывается из скоростей изменения падения напряжения на люминофоре и диэлектрике:

$$dU / dt = dU_L / dt + dU_D / dt. \quad (3)$$

Как известно, зависимость физических явлений в электролюминесцентных конденсаторах от внешнего напряжения носит пороговый характер. Электрические и электрооптические характеристики тонкопленочных излучателей существенно отличаются для слабых и сильных полей в люминофоре. Когда приложенное напряжение меньше порогового значения, поляризационные явления не наблюдаются и излучение отсутствует. Если приложенное напряжение превышает пороговое значение, происходит изменение поляризационного заряда и яркость излучения резко увеличивается с ростом напряжения. Эти ситуации отличаются характером распределения электрического поля и соотношением между значениями токов, протекающих в слоях тонкопленочной электролюминесцентной структуры.

Когда внешнее напряжение меньше порогового значения, оно распределяется в слоях светоизлучающей структуры в соответствии с их геометрическими емкостями: $dU_L / dU = C / C_L$. При малых напряжениях не происходит изменения поляризационного заряда, ток проводимости в люминофоре отсутствует: $I_{LA} = 0$. В люминесцентной и диэлектрических пленках многослойной структуры протекает ток смещения, т.е. ток заряда-разряда электролюминесцентного конденсатора:

$$I = I_{LC} = I_{DC} = C \cdot dU / dt, \quad (4)$$

где $C = 1 / (1 / C_L + 1 / C_D)$ – емкость тонкопленочной структуры.

Когда внешнее напряжение превышает пороговое значение, происходит резкое увеличение скорости протекания поляризационного процесса, ток проводимости возрастает, что обуславливает ограничение роста напряженности электрического поля в люминофоре и падение напряжения в люминесцентной пленке, т.е. $U_L = U_{LT}$ и $dU_L / dt = 0$. Подобная фиксация значения напряженности электрического поля в люминофоре (field-clamping) объясняется сильной полевой зависимостью скорости изменения поляризационного заряда, обусловленной туннелированием электронов из ловушек границы раздела люминофор – диэлектрик [5].

В этом случае увеличение падения напряжения в люминофоре с ростом внешнего напряжения не происходит, и изменение приложенного напряжения полностью перераспределяется на слой диэлектрика: $dU / dt = dU_D / dt$. Полный ток в структуре равен току проводимости в слое люминофора и является током смещения в слое диэлектрика, т.е. зарядным током емкости диэлектрика:

$$I = I_{LA} = I_{DC} = C_D \cdot dU / dt . \quad (5)$$

Когда величина внешнего приложенного напряжения соответствует пороговому значению, наблюдается резкое увеличение тока. Величина скачка пропорциональна разности емкостей диэлектрика и всей структуры.

Проводящее состояние люминофора, при котором через него протекает ток проводимости, обусловленное изменением поляризационного заряда, создается, когда приложенное напряжение превышает пороговое значение, и исчезает, когда прекращается рост внешнего напряжения. Однако в рамках данной теоретической модели достаточно сложно проводить описание процессов перехода люминофора из высокоомного в проводящее состояние. Это описание может быть сделано либо при упрощенном моделировании с использованием аналитических уравнений с рядом подгоночных параметров, либо на основании экспериментальных исследований.

Наибольший научный и практический интерес представляет изучение зависимости распределения потенциала и тока в тонкопленочном электролюминесцентном излучателе для симметричного импульсного напряжения, так как в технической литературе отсутствуют какие-либо сведения об изучении переходных процессов в схемах с тонкопленочными электролюминесцентными конденсаторами и последовательно включенными паразитными резисторами, при данном виде возбуждения.

2. Математическое моделирование переходных электрических процессов в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах

Тонкопленочные электролюминесцентные конденсаторы используются в качестве элементов перспективных плоских активных твердотельных индикаторных устройств [1]. Поэтому для разработки эффективных индикаторов и разработки режимов возбуждения электролюминесценции необходимы исследования переходных электрических характеристик тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов с последовательным резистором в составе схемы управления.

Структура ТЭЛК представляет собой последовательно нанесенные на стеклянную подложку пленки прозрачного электрода, диэлектрика, люмино-

фора, диэлектрика и непрозрачного электрода. Соответственно эквивалентная схема должна содержать элементы, отражающие свойства всех слоев [6].

Тонкопленочный электролюминесцентный конденсатор входит в состав схемы управления индикаторами, поэтому представляет практический интерес изучение электрических характеристик элемента в цепи, включающей паразитный элемент. В качестве такого элемента в состав схемы включен резистор R , имитирующий сопротивление проводников и внутреннее сопротивление источника напряжения (рис. 1).

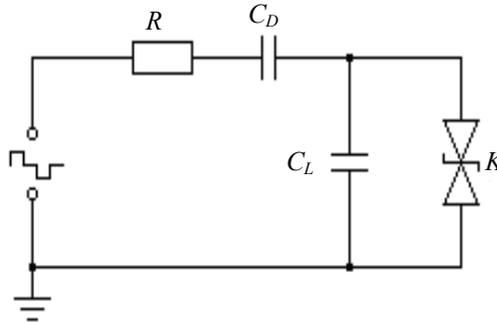


Рис. 1. Эквивалентная схема тонкопленочного электролюминесцентного конденсатора в схеме управления

Основной задачей математического моделирования переходных процессов в тонкопленочном электролюминесцентном конденсаторе стало исследование влияния последовательного паразитного резистора на напряжение и ток в ТЭЛК при возбуждении знакопеременным импульсным напряжением.

Обозначим напряжение на зажимах цепи U , а напряжение и заряд на обкладках электролюминесцентного конденсатора U_C и Q соответственно.

Тогда

$$U = U_C + I \cdot R, \quad (6)$$

где I – ток, протекающий в цепи.

Так как значение тока определяется скоростью изменения заряда на обкладках конденсатора, то

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CU_C)}{dt} = C \frac{dU_C}{dt}, \quad (7)$$

где $C = (C_D^{-1} + C_L^{-1})^{-1}$ – емкость тонкопленочного электролюминесцентного конденсатора.

Уравнение (6) может быть записано с учетом соотношения (7) в следующем виде:

$$U = U_C + RC \frac{dU_C}{dt}. \quad (8)$$

Соответствующее однородное уравнение, определяющее свободное напряжение U_C^0 , имеет вид $U_C^0 + RC \frac{dU_C^0}{dt} = 0$. Его характеристическое урав-

нение $RC\alpha + 1 = 0$ имеет единственный корень $\alpha = -\frac{1}{RC}$. Поэтому

$U_C^0 = Ae^\alpha = Ae^{\frac{-t}{RC}} = Ae^{\frac{-t}{\tau}}$, где $\tau = RC$ – постоянная времени рассматриваемой цепи.

Для переходного процесса получается следующее общее решение для напряжения на обкладках электролюминесцентного конденсатора:

$$U_C = U_C^0 + U_C^1 = U_C^0 + Ae^{\frac{-t}{\tau}}, \quad (9)$$

где установившееся напряжение U_C^0 может быть найдено, если известен вид функции $U(t)$, а постоянная интегрирования A определяется исходя из начальных условий.

Данный метод анализа переходных процессов является классическим и с его помощью получены математические описания электрических переходных процессов в схеме с тонкопленочным электролюминесцентным конденсатором и паразитным резистором для симметричного знакопеременного импульсного напряжения [7]. Однако расчет переходных процессов в таких цепях имеет более сложные решения, обусловленные нелинейной зависимостью электрических параметров элементов от приложенного напряжения. Тонкопленочный электролюминесцентный конденсатор может быть представлен схемой замещения, состоящей из емкости диэлектрических слоев и емкости слоя люминофора, которая шунтируется при больших напряжениях $U > U_P$ [8]. Поэтому представляет интерес анализ электрических переходных процессов при выключении и включении именно емкости C_L , происходящих при напряжении переключения $U = U_P$ и амплитудном напряжении $U = U_A$ знакопеременного импульсного напряжения (рис. 2).

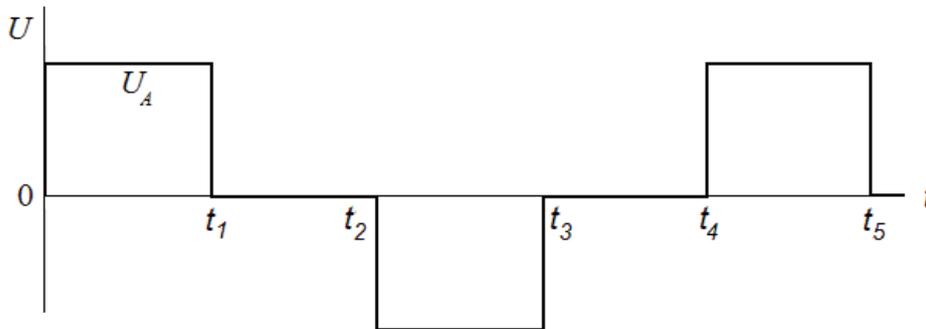


Рис. 2. Форма возбуждающего напряжения

Напряжение на обкладках электролюминесцентного конденсатора U_C складывается из напряжения на диэлектрических слоях U_D и напряжения на слое люминофора U_L : $U_C = U_D + U_L$. Вследствие шунтирования емкости люминофора стабилизаторами для больших значений напряжения ($U > U_P$)

распределение напряжения U_C между слоями диэлектрика и люминофора зависит от величины приложенного напряжения.

1. При возбуждении электролюминесценции в тонкопленочном конденсаторе импульсным напряжением для начального состояния перед подачей напряжения были заданы условия: $U = 0$, $U_C = 0$, $U_R = 0$, $I = 0$.

В начальный момент подачи напряжения значения параметров составили:

$$U = U_A, U_C = 0, I = \frac{U_A}{R}, U_R = I_D \cdot R = U_A.$$

Когда $t > 0$, решение уравнения (8) для напряжения и тока имеет следующий вид:

$$U_C = U_A(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), I = C \frac{dU_C}{dt} = (U_A/R)e^{-\frac{t}{\tau}}, U_R = U_A e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Распределение напряжения U_C между слоями диэлектрика и люминофора на этом участке роста напряжения определяется значениями емкостей C_D и C_L :

$$U_D(t) = U_C(t) \frac{C}{C_D}, U_L(t) = U_C(t) \frac{C}{C_L}.$$

Данное решение используется для описания электрических характеристик, когда напряжение на электролюминесцентном конденсаторе не превышает порогового значения:

$$U_{CT} = U_{LT} \frac{C_L}{C} = E_{LT} d_L \frac{C_L}{C}, \quad (10)$$

где U_{LT} и E_{LT} – пороговое напряжение и пороговое поле, определяемые свойствами люминофора; d_L – толщина люминесцентной пленки.

Соответствующее пороговому напряжению значение времени составляет

$$t_p = -\tau \cdot \ln \left(1 - \frac{U_{CT}}{U_A} \right).$$

Напряжение на резисторе равно

$$U_R = U_A - U_{CT}.$$

Когда напряжение превышает пороговое значение, решение уравнения (8) принимает вид

$$U_C = U_{LT} + (U_A - U_{CT}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{-(t-t_p)}{\tau_D}} \right), U_R = (U_A - U_{CT}) \cdot e^{-\frac{-(t-t_p)}{\tau_D}},$$

$$I = C_D \frac{dU_C}{dt} = \frac{(U_A - U_{CT})}{R} \cdot e^{-\frac{(t-t_p)}{\tau_D}},$$

где $\tau_D = RC_D$.

Этот ток является зарядным током для конденсатора C_D и активным током в слое люминофора, обуславливающим возбуждение свечения в люминесцентном слое.

Когда $U_C > U_{CT}$, напряжение на слое люминофора остается постоянным $U_L = U_{LT}$, что обеспечивается открытым состоянием шунтирующего стабилитрона. В этом случае рост напряжения U_C полностью определяется приращением напряжения на диэлектрических слоях:

$$U_D(t) = U_C(t) - U_{LT};$$

$$U_{LT} = U_{CT} \frac{C}{C_L};$$

тогда

$$U_D = U_{CT} + (U_A - U_{CT}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau_D}} \right) - U_{CT} \frac{C}{C_L} =$$

$$= U_A \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau_D}} \right) + U_{CT} \cdot \left(e^{-\frac{(t-t_n)}{\tau_D}} - \frac{C}{C_L} \right).$$

Когда $t_p < t < t_1$, напряжение на конденсаторе стремится к амплитудному значению $U_C \rightarrow U_A$, а ток стремится к нулю $I \rightarrow 0$.

К моменту времени t_1 окончания первого импульса возбуждающего напряжения:

$$U_{C1} = U_{CT} + (U_A - U_{CT}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t_1-t_p)}{\tau_D}} \right), \quad U_{R1} = (U_A - U_{CT}) \cdot e^{-\frac{(t_1-t_p)}{\tau_D}},$$

$$I_1 = \frac{(U_A - U_{CT})}{R} \cdot e^{-\frac{(t_1-t_p)}{\tau_D}}.$$

2. Для временного интервала $t_1 < t < t_2$, когда значение внешнего напряжения равно нулю:

$$U = U_C + U_R = 0, \quad U_C = U_{C1} \cdot e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau}}, \quad U_R = -U_{C1} \cdot e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau}},$$

$$I = -(U_{C1} / R) \cdot e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau}}.$$

К моменту времени подачи второго импульса значения напряжения на конденсаторе и резисторе и ток составляют:

$$U_{C2} = U_{C1} \cdot e^{-\frac{(t_2-t_1)}{\tau}}, \quad U_{R2} = -U_{C1} \cdot e^{-\frac{(t_2-t_1)}{\tau}}, \quad I_2 = -(U_{C1} / R) \cdot e^{-\frac{(t_2-t_1)}{\tau}}.$$

3. Далее, в момент времени t_2 внешнее напряжение возрастает от 0 до $-U_A$, тогда

$$U_C + U_R = U_C + I \cdot R = -U_A.$$

В начальный момент после подачи второго импульса напряжения

$$U_C = U_{C2}, \quad U_R = -(U_A + U_{C2}), \quad I = -\frac{(U_A + U_{C2})}{R}.$$

В дальнейшем напряжения на конденсаторе и резисторе и ток изменяются со временем следующим образом:

$$U_C = U_{C2} - (U_A + U_{C2}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau}} \right), \quad U_R = -(U_A + U_{C2}) \cdot e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau}},$$

$$I = -\frac{(U_A + U_{C2})}{R} \cdot e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau}}.$$

Напряжение переключения на этом участке с учетом процесса поляризации люминофора предыдущим импульсом напряжения составляет

$$U_{P2} = U_{C1} - 2U_{CT},$$

$$\text{или } U_{P2} = U_{C1} - 2U_{CT} = U_{C2} - (U_A + U_{C2}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t_{P2}-t_2)}{\tau}} \right).$$

Соответствующее значение времени переключения:

$$t_{P2} = t_2 + \tau \cdot \ln \left(\frac{U_A + U_{C2}}{U_A + U_{C1} - 2U_{CT}} \right).$$

К моменту окончания воздействия второго импульса напряжение на конденсаторе и резисторе и ток равны

$$U_C = U_{P2} - (U_A + U_{P2}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t-t_{P2})}{\tau_D}} \right), \quad U_R = -(U_A + U_{P2}) \cdot e^{-\frac{(t-t_{P2})}{\tau_D}},$$

$$I = -\frac{(U_A + U_{P2})}{R} \cdot e^{-\frac{(t-t_{P2})}{\tau_D}}.$$

4. После окончания воздействия второго возбуждающего импульса при $t_2 < t < t_3$: $U_C + U_R = U_C + I \cdot R = 0$, тогда

$$U_C = U_{C3} \cdot e^{\frac{-(t-t_3)}{\tau}}, \quad U_R = -U_{C3} \cdot e^{\frac{-(t-t_3)}{\tau}}, \quad I = -\frac{U_{C3}}{R} \cdot e^{\frac{-(t-t_3)}{\tau}}.$$

К моменту начала работы третьего импульса напряжения на конденсаторе и резисторе и ток составляют:

$$U_{C4} = U_{C3} \cdot e^{\frac{-(t_4-t_3)}{\tau}}, \quad U_{R4} = -U_{C3} \cdot e^{\frac{-(t_4-t_3)}{\tau}}, \quad I_4 = -\frac{U_{C3}}{R} \cdot e^{\frac{-(t_4-t_3)}{\tau}}.$$

5. Для интервала времени действия третьего импульса напряжения (начало второго периода импульсного напряжения):

$$U_C + U_R = U_C + I \cdot R = U_A.$$

В начальный момент после подачи третьего импульса напряжения:

$$U_C = U_{C4}, \quad U_R = U_A + U_{C4}, \quad I = \frac{U_A + U_{C4}}{R}.$$

Далее, в течение воздействия третьего импульса возбуждающего напряжения, при $t \geq t_4$:

$$U_C = (U_A + U_{C4}) \cdot \left(1 - e^{\frac{-(t-t_4)}{\tau}} \right) - U_{C4},$$

$$U_R = U_A + U_{C4} \cdot e^{\frac{-(t-t_4)}{\tau}}, \quad I = \frac{U_A + U_{C4}}{R} \cdot e^{\frac{-(t-t_4)}{\tau}}.$$

Напряжение переключения электролюминесцентной структуры в проводящее состояние на этом участке $U_{P3} = 2U_{CT} - |U_{C3}|$, тогда $U_C = U_{P3} = 2U_{CT} - |U_{C3}|$, а время переключения составит

$$t_{P3} = t_4 + \tau \cdot \ln \left(\frac{U_A + 2U_{C4}}{U_A + |U_{C3}| - 2U_{CT}} \right).$$

К окончанию воздействия третьего импульса напряжения на конденсаторе и резисторе и ток составляют

$$U_C = U_{P3} + (U_A - U_{P3}) \cdot \left(1 - e^{\frac{-(t-t_{P3})}{\tau_D}} \right),$$

$$U_R = (U_A - U_{P3}) \cdot e^{\frac{-(t-t_{P3})}{\tau_D}}, \quad I = \frac{U_A - U_{P3}}{R} \cdot e^{\frac{-(t-t_{P3})}{\tau_D}}.$$

Полученные выражения являются установившимися для всех последующих периодов воздействия знакопеременного импульсного напряжения.

На основе приведенных выше математических выкладок построены графики переходных процессов по напряжению и току (рис. 3) в тонкопленочном электролюминесцентном конденсаторе в цепи с последовательным паразитным резистором при возбуждении знакопеременным импульсным напряжением. Графики наглядно подтвердили, что при переключении ТЭЛК в проводящее состояние на третьем и пятом участках изменение напряжения происходит при меньших значениях напряжения переключения $U_{P2} = U_{C1} - 2U_{CT}$, $U_{P3} = 2U_{CT} - |U_{C3}|$, чем на первом участке:

$$U_{CT} = U_{LT} \frac{C_L}{C} = E_{LT} d_L \frac{C_L}{C}.$$

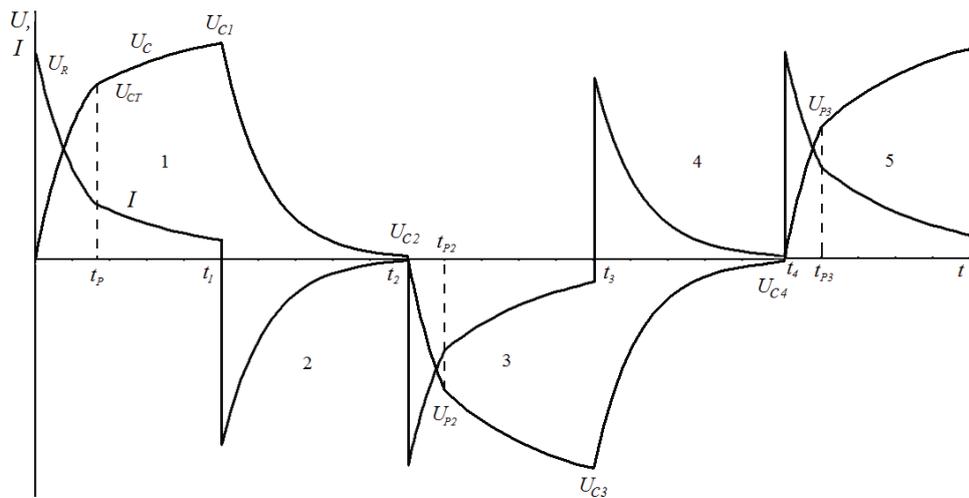


Рис. 3. Графики временной зависимости напряжения U_C и тока I в тонкопленочном электролюминесцентном конденсаторе в цепи с последовательным резистором при возбуждении переменным импульсным напряжением $U(t)$

Адекватность созданной математической модели переходных электрических процессов в тонкопленочном электролюминесцентном конденсаторе была подтверждена проведенными схемотехническими и макетными исследованиями. Значение величины последовательного паразитного резистора изучалось в интервале сопротивлений от 10 Ом до 2 МОм. Максимально допустимое значение сопротивления последовательного резистора зависит от частоты изменения импульсов возбуждающего напряжения. На частоте 1 кГц величина сопротивления R не должна превышать значения 800 кОм, а на частоте 100 Гц – 2 МОм.

Заключение

В работе с использованием схемы замещения описано влияние последовательного паразитного резистора на значение напряжения и тока в тонкопленочном электролюминесцентном конденсаторе для каждого временного интервала возбуждающего напряжения.

Длительность переходных процессов, величина активного тока и напряжение на конденсаторе определяются значениями амплитуды импульсов входного напряжения и периодом их повторения, а также постоянной времени RC -цепи. При уменьшении электродов ТЭЛК уменьшается значение емкости и соответственно постоянной времени цепи, т.е. допускается увеличение сопротивления последовательного резистора при сохранении требований к длительности переходных процессов.

Таким образом, в результате проведенного математического анализа переходных электрических характеристик в ТЭЛК при возбуждении импульсным напряжением получены аналитические соотношения, которые применимы для разработки конструкций и режимов управления электролюминесцентными индикаторами, так как ограничивают выбор источников напряжения по величине внутреннего сопротивления.

Список литературы

1. **Самохвалов, М. К.** Тонкопленочные электролюминесцентные индикаторные устройства / М. К. Самохвалов, А. И. Гусев // Известия вузов. Радиоэлектроника. Военные электронные технологии. – 2002. – Т. 45, № 3–4. – С. 58–63.
2. **Георгобиани, А. Н.** Туннельные явления в люминесценции полупроводников / А. Н. Георгобиани, П. А. Пипинис. – М. : Мир, 1994. – 224 с.
3. **Самохвалов, М. К.** Тонкопленочные электролюминесцентные источники излучения / М. К. Самохвалов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 1999. – 117 с.
4. **Казанкин, О. И.** Прикладная электролюминесценция / О. И. Казанкин, И. Я. Лямичев, Ф. В. Соркин ; под ред. М. В. Фока. – М. : Советское радио, 1974. – 414 с.
5. **Самохвалов, М. К.** Кинетика токопереноса в тонкопленочных электролюминесцентных излучателях при возбуждении переменным напряжением / М. К. Самохвалов // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т. 20, № 6. – С. 67–71.
6. **Самохвалов, М. К.** Тонкопленочные электролюминесцентные источники излучения и индикаторные устройства / М. К. Самохвалов // Проектирование и технология электронных средств. – 2001. – № 1. – С. 24–25.
7. **Нейман, Л. Р.** Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан. – Л. : Энергоиздат, 1981. – Т. 1. – С. 319–336.
8. **Самохвалов, М. К.** Эквивалентная электрическая схема тонкопленочных электролюминесцентных излучателей / М. К. Самохвалов // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19, № 9. – С. 14–18.

Самохвалов Михаил Константинович

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
проектирования и технологии
электронных средств, Ульяновский
государственный технический
университет, действительный член
РАЕН, член Российского отделения
Общества информационных дисплеев
(SID)

E-mail: sam@ulstu.ru.

Samokhvalov Mikhail Konstantinovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, head of sub-department
of electronic devices design and technology,
Ulyanovsk State Technical University,
full member of the Russian Academy
of Natural Sciences, member of the Russian
Chapter of Society for Information
Displays (SID)

Тахтенкова Марина Олеговна

аспирант, Ульяновский государственный
технический университет

E-mail: tsa2003@hotmail.ru

Takhtenkova Marina Olegovna

Postgraduate student,
Ulyanovsk State Technical University

УДК 621.396.6.011.712

Самохвалов, М. К.

Математическое моделирование переходных электрических процессов в тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторах с последовательным резистором цепи в схемах управления индикаторами / М. К. Самохвалов, М. О. Тахтенкова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 175–186.

П. В. Колготин, А. Ю. Колотков, В. В. Дорошкевич,
Н. Б. Румянцева, С. Л. Зефирова, Б. В. Султанов

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С РАВНОМЕРНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ

Аннотация. Описана цифровая система фазовой синхронизации с равномерной дискретизацией и аналогово-цифровым преобразованием до петли фазовой автоподстройки. На основе метода D -разбиения определены области асимптотической устойчивости рассматриваемой системы третьего порядка. Выявлены области значений параметров k_1, k_2, k_3 , при которых все корни характеристического уравнения линейного приближения рассматриваемой дискретной нелинейной системы на комплексной плоскости находятся внутри единичной окружности.

Ключевые слова: цифровая система фазовой синхронизации, математическая модель, асимптотическая устойчивость, D -разбиение, передаточная функция, характеристическое уравнение, особая прямая, D -кривая, область устойчивости.

Abstract. The article describes a digital phase-locked loop (DPLL) system with even digitization and analog-to-digital conversion to a closed loop of PLL. On the basis of D -decomposition method the authors has defined domains of asymptotic stability of DPLL under consideration. Besides that they have detected a range of values of k_1, k_2, k_3 parameters for which all the roots of characteristic equation of linear approximation of considered discrete nonlinear system are within complex plane unit circumference.

Key words: digital phase-locked loop, mathematical model, asymptotic stability, D -decomposition, transfer function, characteristic equation, singular line, D -curve, domain of stability.

Введение

Объектом исследования являются системы фазовой синхронизации (СФС) с равномерной дискретизацией (РД) [1], которые представляют собой дискретные аналоги цифровых систем фазовой синхронизации (ЦСФС) с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) до контура регулирования, получаемые в предположении бесконечной разрядности АЦП. Подобные системы используются при когерентном приеме сигналов с различными видами модуляции в составе разнообразных устройств техники связи, применяемых в защищенных телекоммуникационных системах (в частности, при построении цифровых модемов и эхокомпенсаторов [2]), а также в измерительно-вычислительных комплексах (например, для оценки параметров гармонического колебания, наблюдаемого на фоне шума [3]) и т.д.

1. Описание СФС третьего порядка и условия асимптотической устойчивости

В работе [1] получена математическая модель СФС третьего порядка в виде нелинейного разностного уравнения:

$$\psi[k] - 3\psi[k-1] + 3\psi[k-2] - \psi[k-3] + k_1 \sin \psi[k-1] +$$

$$+k_2 \sin \psi[k-2] + k_3 \sin \psi[k-3] = \varphi[k] - 3\varphi[k-1] + 3\varphi[k-2] - \varphi[k-3] - k_1 n_{\text{ш}}[k-1] - k_2 n_{\text{ш}}[k-2] - k_3 n_{\text{ш}}[k-3], \quad (1)$$

где $k_1 = \beta + \mu + \gamma$; $k_2 = -(2\beta + \mu)$; $k_3 = \beta$; β, μ, γ – соответствующие масштабирующие коэффициенты цифрового фильтра (ЦФ) СФС, определяющего порядок и свойства этой системы, структура которого показана на рис. 1; $\psi[k]$ – отсчет фазового рассогласования на выходе системы синхронизации; $\varphi[k]$ – отсчет фазы задающего колебания; $n_{\text{ш}}[k]$ – отсчет аддитивного шума на входе системы синхронизации; k – номер отсчета.

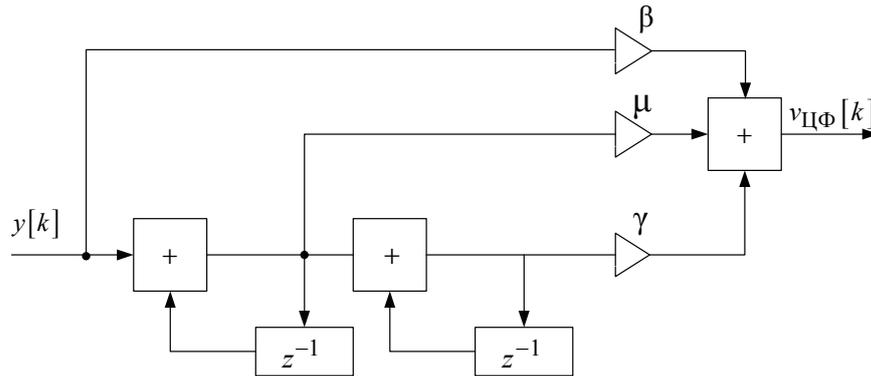


Рис. 1. Структура ЦФ третьего порядка, применяемых в СФС

Условием асимптотической устойчивости подобных дискретных нелинейных систем, как отмечается в работе [4], является расположение нулей характеристических полиномов (корней характеристических уравнений) их линейного приближения на комплексной плоскости внутри единичной окружности. Поскольку характеристическое уравнение исследуемой ЦСФС имеет высокий порядок, выражения для его корней в явном виде получены быть не могут. В этих условиях для определения областей асимптотической устойчивости рассматриваемой ЦСФС целесообразно применить разработанный в теории автоматического регулирования метод D -разбиения [5], несколько видоизменив его применительно к анализу дискретных систем, описываемых в операторной форме с помощью Z -преобразования.

2. Исследование асимптотической устойчивости методом D -разбиения

При отсутствии шума ($n_{\text{ш}} = 0$) и в предположении $\sin(\bullet) = (\bullet)$ (в линейном приближении) уравнение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \psi[k] - (3 - k_1)\psi[k-1] + (3 + k_2)\psi[k-2] - (1 - k_3)\psi[k-3] = \\ = \varphi[k] - 3\varphi[k-1] + 3\varphi[k-2] - \varphi[k-3]. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда передаточная функция линеаризованной системы по фазовой ошибке $H_{\psi 3}(z)$ определяется по временному алгоритму (2) как

$$H_{\psi 3}(z) = \frac{1 - 3z^{-1} + 3z^{-2} - z^{-3}}{1 - (3 - k_1)z^{-1} + (3 + k_2)z^{-2} - (1 - k_3)z^{-3}} =$$

$$= \frac{z^3 - 3z^2 + 3z - 1}{z^3 - (3 - k_1)z^2 + (3 + k_2)z - (1 - k_3)}. \quad (3)$$

В соответствии с (3) характеристическое уравнение исследуемой ЦСФС имеет вид

$$z^3 - (3 - k_1)z^2 + (3 + k_2)z - (1 - k_3) = 0. \quad (4)$$

Задачей анализа является выявление области значений параметров k_1, k_2, k_3 , при которых все корни уравнения (4) на комплексной плоскости находятся внутри единичной окружности.

Для решения этой задачи трансформируем границу устойчивости на комплексной плоскости в плоскость, задаваемую уравнением единичной окружности

$$z = \exp(j \omega_0), \quad (5)$$

где $\omega_0 = 2 \pi f / f_d$ – безразмерный аргумент образующего единичного радиус-вектора.

Подстановкой (5) в (4) в результате получим

$$\exp(j 3\omega_0) - (3 - k_1)\exp(j 2\omega_0) + (3 + k_2)\exp(j \omega_0) - (1 - k_3) = 0.$$

Воспользовавшись формулой Эйлера, последнее уравнение можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \cos 3\omega_0 - (3 - k_1)\cos 2\omega_0 + (3 + k_2)\cos \omega_0 - (1 - k_3) + \\ & + j[\sin 3\omega_0 - (3 - k_1)\sin 2\omega_0 + (3 + k_2)\sin \omega_0] = 0. \end{aligned}$$

Приравнивая нулю действительную и мнимую части последнего выражения, получаем систему уравнений относительно k_1, k_2 , а k_3 выделяем в качестве фиксированного параметра:

$$\begin{cases} k_1 \cos 2\omega_0 + k_2 \cos \omega_0 = -\cos 3\omega_0 + 3 \cos 2\omega_0 - 3 \cos \omega_0 + 1 - k_3, \\ k_1 \sin 2\omega_0 + k_2 \sin \omega_0 = -\sin 3\omega_0 + 3 \sin 2\omega_0 - 3 \sin \omega_0. \end{cases} \quad (6)$$

Определители этой системы имеют вид

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} \cos 2\omega_0 & \cos \omega_0 \\ \sin 2\omega_0 & \sin \omega_0 \end{vmatrix} = -\sin \omega_0; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{k1} &= \begin{vmatrix} (-\cos 3\omega_0 + 3 \cos 2\omega_0 - 3 \cos \omega_0 - k_3 + 1) & \cos \omega_0 \\ (-\sin 3\omega_0 + 3 \sin 2\omega_0 - 3 \sin \omega_0) & \sin \omega_0 \end{vmatrix} = \\ &= -(2 + k_3 - 2 \cos \omega_0) \sin \omega_0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{k2} &= \begin{vmatrix} \cos 2\omega_0 & (-\cos 3\omega_0 + 3 \cos 2\omega_0 - 3 \cos \omega_0 - k_3 + 1) \\ \sin 2\omega_0 & (-\sin 3\omega_0 + 3 \sin 2\omega_0 - 3 \sin \omega_0) \end{vmatrix} = \\ &= 2[1 + (k_3 - 1) \cos \omega_0] \sin \omega_0. \end{aligned} \quad (9)$$

На основании выражений (7)–(9) можно записать выражения для решения системы (6):

$$\begin{cases} k_1 = 2 + k_3 - 2 \cos \omega_0, & (10) \\ k_2 = -2[1 + (k_3 - 1) \cos \omega_0]. & (11) \end{cases}$$

Соотношения (10), (11) представляют собой параметрические уравнения кривой D -разбиения в плоскости параметров k_1 и k_2 при фиксированном параметре k_3 в интервале $(0 \div \pi)$. Ввиду четности и периодичности относительно ω_0 функций, представленных в правых частях соотношений (10) и (11), при изменении ω_0 в диапазоне $(\pi \div 2\pi)$ получается та же ветвь D -кривой (в плоскости параметров k_1 и k_2 при фиксированном параметре k_3), что и при $\omega \in (0 \div \pi)$, пробегаемая в обратном направлении.

Избавимся от параметра ω_0 в выражениях (10) и (11). Из (10) находим

$$\cos \omega_0 = \frac{k_3 - k_1 + 2}{2}.$$

Подставляя последнее равенство в (11), получаем

$$k_2 = -2 \left[1 + (k_3 - 1) \left(\frac{k_3 - k_1 + 2}{2} \right) \right].$$

После упрощения:

$$k_2 = k_1(k_3 - 1) - k_3(1 + k_3). \quad (12)$$

Последнее выражение представляет собой уравнение кривой D -разбиения в явном виде. Из (12) видно, что уравнение D -кривой в плоскости параметров k_1 и k_2 при фиксированном параметре k_3 представляет собой прямую, которая в зависимости от k_3 имеет разный угол наклона и разное смещение по оси k_2 .

Из анализа определителей (8)–(10) видно, что они обращаются в ноль при $\omega_0 = 0$ и $\omega_0 = \pi$. Это говорит о наличии на диаграмме D -разбиения двух особых прямых. Уравнение первой из них, соответствующей $\omega_0 = 0$, получается путем подстановки в (4) значения $z = \exp(j0) = 1$ и имеет вид

$$\begin{aligned} 1 - (3 - k_1)1 + (3 + k_2)1 - 1 + k_3 &= 0, \\ k_2 &= -k_1 - k_3. \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогично уравнение второй особой прямой находится с помощью подстановки $z = \exp(j\pi) = -1$ в (4):

$$\begin{aligned} -1 + (3 - k_1)1 - (3 + k_2)1 - 1 + k_3 &= 0, \\ k_2 &= k_1 + k_3 - 8. \end{aligned} \quad (14)$$

Рассмотрим общие закономерности, присущие выражениям (12), (13) и (14). Положим в (13) и в (14) $k_3 = 0$, тогда графики особых прямых в плоскости параметров k_1 и k_2 будут иметь вид, показанный на рис. 2.

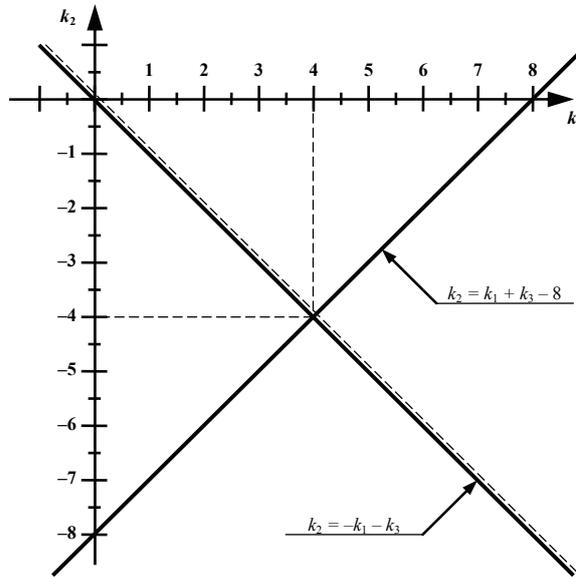


Рис. 2. Диаграмма D -разбиения в плоскости параметров k_1 и k_2 при $k_3 = 0$

После подстановки (13) в (14) точка пересечения особых прямых будет

$$k_1 - k_3 = 4. \quad (15)$$

При $k_3 = 0$ $k_1 = 4$, а $k_2 = -4$ (рис. 2). С ростом или уменьшением k_3 первая особая прямая (13) соответственно опускается или поднимается параллельно самой себе. Вторая особая прямая с ростом k_3 поднимается, а с уменьшением k_3 опускается параллельно самой себе. Так, в плоскости $k_3 = 2$ особые прямые будут иметь вид, показанный на рис. 3.

Точка пересечения первой и второй прямых при $k_3 = 2$ будет

$$\begin{aligned} k_1 &= 4 - k_3 = 2, \\ k_2 &= -k_1 - k_3 = -4. \end{aligned}$$

Точка пересечения двух особых прямых при фиксированном k_3 в общем случае будет (15).

При этом k_2 можно найти либо из (13), либо из (14).

Сама D -кривая в соответствии с (12) при $k_3 = 0$ будет иметь вид $k_2 = k_1$, т.е. будет совпадать с первой особой прямой. На рис. 2 она показана штриховой линией.

При $k_3 = 2$ D -кривая совпадает со второй особой прямой, что показано штриховой линией на рис. 3.

С ростом k_3 от нуля до двух D -кривая (в данном случае прямая) будет поворачиваться против часовой стрелки. Найдем значение k_3 , при котором

D -кривая будет параллельна оси k_1 . Для этого в (12) положим $k_3 - 1 = 0$, отсюда $k_3 = 1$. Эта ситуация показана на рис. 4.

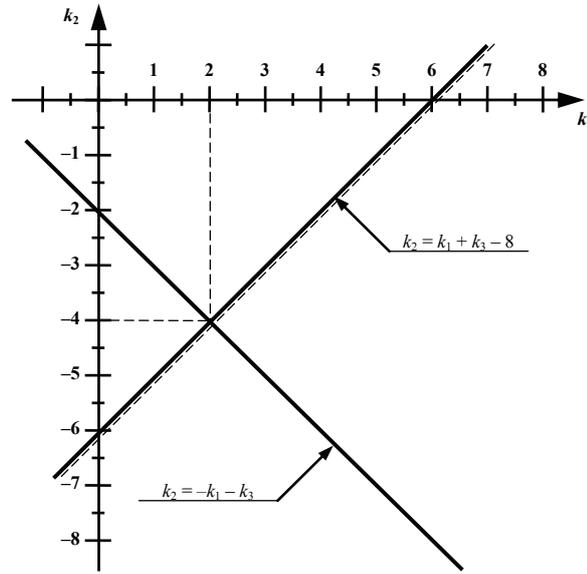


Рис. 3. Диаграмма D -разбиения в плоскости параметров k_1 и k_2 при $k_3 = 2$

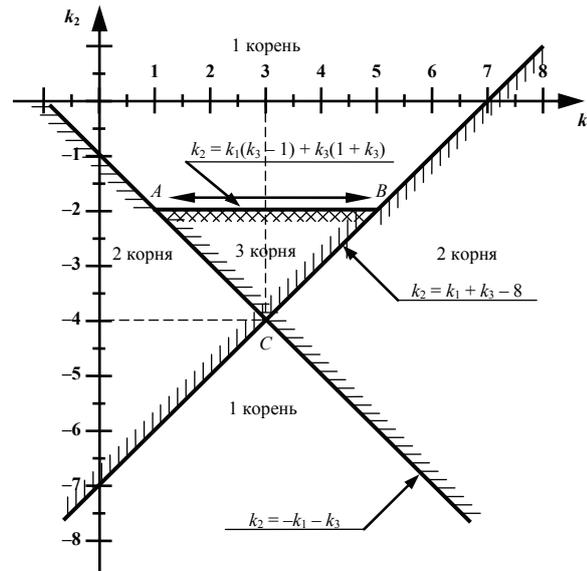


Рис. 4. Диаграмма D -разбиения в плоскости параметров k_1 и k_2 при $k_3 = 1$

Штриховка кривых D -разбиения и особых прямых выполнена на основании анализа знака главного определителя, задаваемого выражением (7) по правилам, приводимым в [5], для непрерывных систем, с той лишь разницей, что диапазон изменения ω_0 является не $-\infty \div 0 \div \infty$, а $0 \div \pi \div 2\pi$.

Так, на рис. 4 точка A с координатами $k_1 = 1$ и $k_2 = -2$ соответствует $\omega_0 = 0$ и получена из выражений (10), (11). Точка B с координатами $k_1 = 5$ и

$k_2 = -2$ соответствует $\omega_0 = \pi$. При движении от A к B знак главного определителя (7) отрицательный, значит, штрихуется правая сторона D -кривой. При изменении ω_0 от π до 2π движение осуществляется в обратном направлении от точки B к точке A , знак главного определителя положительный и штрихуется левая сторона D -кривой, т.е. отрезок AB штрихуется дважды.

Штриховка особых прямых осуществляется в соответствии со штриховкой D -кривой, причем одновременно заштрихованные или одновременно не заштрихованные стороны кривой и прямой располагаются навстречу друг другу.

Таким образом, зона устойчивости ЦСФС третьего порядка располагается внутри треугольника ABC (рис. 4). Причем точка пересечения первой особой прямой (13) с D -кривой (точка A) при фиксированном k_3 в общем случае будет $k_1(k_3 - 1) - k_3(1 + k_3) = -k_1 - k_3$, откуда

$$k_1 = k_3. \quad (16)$$

Точка пересечения особых прямых в таком случае определяется выражением (15), а точка пересечения второй особой прямой (14) с D -кривой (точка B) при фиксированном k_3 в общем случае будет $k_1(k_3 - 1) - k_3(1 + k_3) = k_1 + k_3 - 8$, откуда

$$k_1 = 4 + k_3. \quad (17)$$

Итак, исходя из построения области устойчивости, на рис. 4 с учетом (15), (16) и (17) условие устойчивости для ЦСФС третьего порядка выражается следующим образом:

$$0 < k_3 < 2, \\ k_1(k_3 - 1) - k_3(1 + k_3) > k_2 > \begin{cases} -k_1 - k_3 & \text{при } k_3 < k_1 < 4 - k_3, \\ k_1 + k_3 - 8 & \text{при } 4 - k_3 < k_1 < 4 + k_3. \end{cases}$$

Заключение

Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего анализа характеристик рассмотренного класса ЦСФС в предположении их действительной нелинейности и наличия шума.

Список литературы

1. Султанов, Б. В. Математические модели цифровых систем фазовой синхронизации с равномерной дискретизацией / Б. В. Султанов, М. А. Щербаков, В. Е. Захаренков, В. В. Дорошкевич // Цифровая обработка сигналов и ее применение : доклады 4-й Международной конференции (Москва, 27 февраля – 1 марта 2002 г.). – М., 2002. – Т. 1. – С. 106–109.
2. Бочков, В. К. Двухпроводный дуплексный модем / В. К. Бочков и др. // Электросвязь. – 2000. – № 7. – С. 35–38.
3. Султанов, Б. В. Применение цифровых систем фазовой синхронизации для измерения сдвига частоты гармонического сигнала на фоне шума / Б. В. Султанов // Радиотехника. – 2000. – № 9. – С. 21–26.

4. **Султанов, Б. В.** Анализ цифровых систем фазовой синхронизации на основе функциональных разложений Вольтера / Б. В. Султанов, М. А. Щербаков. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 172 с.
5. **Егоров, К. В.** Основы теории автоматического регулирования / К. В. Егоров. – М. : Энергия, 1967. – 648 с.

Колготин Павел Вячеславович

инженер, Центр специальной связи
и информации ФСО России
в Пензенской области

E-mail: mr_jok@rambler.ru

Kolgotin Pavel Vyacheslavovich

Engineer, Center of Special Communication
and Information, Federal Protective
Service of Russia in Penza region

Колотков Александр Юрьевич

ассистент, кафедра информационной
безопасности систем и технологий,
Пензенский государственный
университет

E-mail: ibst@pnzgu.ru

Kolotkov Alexander Yuryevich

Assistant, sub-department of information
security of systems and technologies,
Penza State University

Дорошкевич Виктор Вениаминович

ассистент, кафедра информационной
безопасности систем и технологий,
Пензенский государственный
университет

E-mail: ibst@pnzgu.ru

Doroshkevich Viktor Veniaminovich

Assistant, sub-department of information
security of systems and technologies,
Penza State University

Румянцева Нина Борисовна

программист, кафедра информационной
безопасности систем и технологий,
Пензенский государственный
университет

E-mail: ibst@pnzgu.ru

Rumyantseva Nina Borisovna

Programmer, sub-department of information
security of systems and technologies,
Penza State University

Зефирова Сергей Львович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационной
безопасности систем и технологий,
Пензенский государственный
университет

E-mail: ibst@pnzgu.ru

Zefirov Sergey Lvovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of sub-department
of information security of systems
and technologies, Penza State University

Султанов Борис Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационной безопасности
систем и технологий, Пензенский
государственный университет

E-mail: ibst@pnzgu.ru

Sultanov Boris Vladimirovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of information security
of systems and technologies,
Penza State University

УДК 681.511.42

Колготин, П. В.

Исследование асимптотической устойчивости систем фазовой синхронизации с равномерной дискретизацией / П. В. Колготин, А. Ю. Колотков, В. В. Дорошкевич, Н. Б. Румянцева, С. Л. Зефирова, Б. В. Султанов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 187–195.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 532.517.2:534.2

Б. А. Снигерев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРНОЙ ЖИДКОСТИ ИЗ СТУПЕНЧАТОЙ ФОРМУЮЩЕЙ НАСАДКИ

Аннотация. Работа посвящена моделированию медленного движения вязкоупругой жидкости со свободной поверхностью, реализующейся при входе полимерной жидкости в формующую насадку и выходе из нее. Движение жидкости описывается уравнениями сохранения массы, импульса и энергии, дополненными реологическим уравнением состояния среды Гиесекуза. На основе метода конечных элементов разработан устойчивый численный алгоритм решения задачи. Проведены численные исследования по определению формы выходной струи для различных режимов течения и формы насадки. Исследована картина распределения скорости жидкости, давления, напряжений и температуры при увеличении степени нагрева стенки насадки. Получены численные результаты зависимости эффекта разбухания полимера от параметров реологической модели и температурных факторов.

Ключевые слова: вязкоупругая жидкость, свободная поверхность.

Abstract. Numerical simulation flow of viscoelastic fluid with free surface, which is realized in entrance and output flow in extrusion die was performed. The flow of liquid is described by equations of conservation of mass, momentum and thermal energy with rheological constitutive equation of Giesekus. On basis of finite element method the stable numerical scheme was developed to solve this problem. Different numerical experiments was performed to define the configuration of outflow jet in various regimes and construction of die. The distribution of flow velocity fields, pressure and temperature are investigated on dependence of heating the walls. The ratio of extrusion in dependence of parameters the rheological model are investigated.

Key words: viscoelastic fluid, free surface.

Введение

Экструзия является одним из основных способов переработки резиновых смесей в изделия. В современных рыночных условиях на промышленных предприятиях резинотехнической, кабельной, шинной промышленности предъявляются высокие требования к качеству изделий, которое определяет во многом себестоимость продукции, а следовательно, ее конкурентоспособность. Одним из факторов, влияющих на качество изделия, является выбор технологических параметров процесса экструзии и их соблюдение. Теоретические и экспериментальные исследования процессов, проходящих в канале формующей головки экструдера при переработке резиновых смесей, в публикациях представлены весьма ограниченно [1, 2]. Для производства резино-

технических изделий высокого качества целесообразно предусмотреть контроль и автоматическое управление процессом экструзии. При разработке автоматических систем управления процессом экструзии на экструзионных машинах необходимо иметь адекватные математические модели, описывающие стационарные и нестационарные режимы ее работы. К настоящему времени число работ, посвященных исследованию гидродинамических процессов в канале формующей головки и экструзии из формующей насадки, незначительно. Работы по исследованию гидродинамических процессов в экструзионных машинах, перерабатывающих резиновые смеси, ограничены экспериментальными исследованиями, проведенными на лабораторных машинах.

1. Математическая постановка задачи

В данной работе рассматривается вытекание вязкоупругой жидкости из цилиндрической ступенчатой щелевой насадки, схема которой представлена на рис. 1 (h обозначает радиус узкого канала выходной части насадки; $4h$ – радиус трубы на входе; $h_1=0,5h$ – длина закругленной части; L – длина выходной части насадки). Рассматривается влияние длины выходной части насадки на степень разбухания полимерной жидкости в процессе экструзии. Выбираются значения L , равные $L=0, 2h, 4h, 10h$. Анализируется также влияние реологических параметров на характер истечения из насадки.

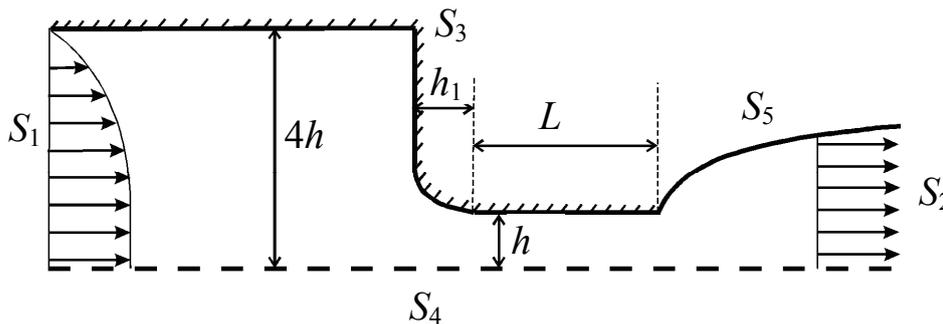


Рис. 1. Схема вытекания вязкоупругой жидкости из ступенчатой цилиндрической насадки

Введем следующие обозначения границ: S_1 – входное сечение; S_2 – выходное сечение струи; S_3 – часть границы, являющейся твердой стенкой; S_4 – граница, являющаяся осью симметрии области; S_5 – часть границы, приходящаяся на свободную поверхность.

Исходной является система уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии, для замыкания которой привлекается конститутивное реологическое соотношение Гиесекуза [2, 3]:

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0,$$

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \tau_{ij}^V + 2\eta_N D_{ij}, \quad \frac{\delta \tau_{ij}^V}{\delta t} = \frac{\partial \tau_{ij}^V}{\partial t} + v^k \frac{\partial \tau_{ij}^V}{\partial x^k} - \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \tau_{kj}^V - \tau_{ik}^V \frac{\partial v_k}{\partial x_j}; \\ \tau_{ij}^V + We \frac{\delta \tau_{ij}^V}{\delta t} + \frac{\alpha \lambda}{\eta_V} \tau_{ij}^{V2} &= 2\eta_V D_{ij}; \quad D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \\ \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) &= k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + (\tau_{ik} \cdot D_{kj}), \end{aligned} \quad (1)$$

где v_i – компоненты скорости жидкости; x_i, x_j – координаты ($i, j=1, 2$); t – время; ρ – плотность; P – давление; τ_{ij} – девиатор напряжения; τ_{ij}^V – вязкоупругая часть напряжения; T – температура жидкости; $\eta = \eta_V + \eta_N$; η_V, η_N – динамические вязкости при нулевой скорости сдвига полимера и растворителя соответственно; λ – время релаксации напряжений; k – коэффициент теплопроводности; c_p – удельная теплоемкость полимера при постоянном давлении; α – безразмерный параметр модели Гиесекуза, определяющий вязкоупругие свойства полимерной жидкости.

Для зависимости вязкости и времени релаксации от температуры используется соотношение Аррениуса [1, 2]:

$$\eta(T) = \eta_0 a(T), \quad \lambda(T) = \lambda_0 a(T), \quad a(T) = \exp \left[\frac{E}{R} (1/T - 1/T_0) \right],$$

где индекс 0 означает, что значение параметра берется при температуре T_0 ; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная.

Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} S_1: v_2 = v_2(x_2), \quad \tau_{ij}^V &= \tau_{ij}^V(x_2), \quad T = T_0(x_2); \\ S_2: v_2 = 0, \quad \partial v_1 / \partial x_1 &= 0, \quad \partial T / \partial x_1 = 0; \quad S_3: v_i = 0, \quad T = T_2; \\ S_4: v_2 = 0, \quad \tau_{12}^V &= 0, \quad \partial T / \partial x_2 = 0; \quad S_5: dx_i / dt = v_i, \\ n_i \tau_{ij} n_j - (P - P_0) n_i &= (1/\sigma_p) 2K, \quad n_i \tau_{ij} t_i = 0, \quad k \partial T / \partial n = -\alpha_p (T - T_0), \end{aligned}$$

где n_i, t_i – компоненты единичной нормали и касательной к поверхности S_5 ; P_0 – внешнее давление над свободной поверхностью; σ_p – коэффициент поверхностного натяжения; α_p – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; K – кривизна свободной поверхности; T_2 – температура стенок канала; T_1 – температура жидкости на входе; T_0 – температура окружающей среды. Исходная система уравнений (1) преобразуется в безразмерный вид. Для этого в качестве определяющих параметров приняты параметры: U_0 – средняя скорость жидкости на входе; L_0 – характерный размер, равный полуширине канала h ; давление и напряжения отнесены к значению $\rho U_0 / L_0$.

Определяющими являются безразмерные параметры: $Re = \rho U L / \eta$ – число Рейнольдса, $We = \lambda U / L$ – число Вайсенберга; $Pe = \rho c_p U L / k$ – число Пекле, $Bg = \eta U^2 / (T_1 - T_0)$ – число Бринкмана; $Ca = \eta U_0 / \sigma_p$ – число капиллярности; $\beta = \eta_N / \eta$ – параметр ретардации; $Bi = \alpha_p L_0 / k$ – параметр Био.

Аппроксимация уравнений (1) и вычисления проводятся методом конечных элементов (МКЭ) второго порядка на нерегулярных сетках, сгущающихся в зоне истечения полимера из насадки. Для расчетов строилась последовательность сгущающихся сеток 9-узловых четырехугольных элементов (число узлов 5000, 18400). Для расчета напряжения использовались линейные четырехугольные элементы. Местоположение деформируемой свободной поверхности находится из аппроксимации кинематического условия, затем сетка конечных элементов вблизи нее перестраивается для получения решений уравнений (1), с помощью которых находится поле скоростей, давлений, напряжений и температур на новом временном слое. Стационарное положение формы выходящей струи находится методом установления эволюционной задачи с использованием традиционных для уравнений данного класса алгоритмов [4].

2. Результаты исследования

Для изотермического обтекания значения всех параметров рассматриваются при температуре $T_0 = 303$ К. В случае неизотермического обтекания рассматривается истечение полимерной жидкости из насадки с нагретыми стенками, температура которой повышается до $T_2 = 323, 353$ К соответственно. Расчеты проводились при следующих значениях теплофизических свойств полимерной жидкости: $\rho = 924$ кг/м³, $\eta = 10^4$ Па·с, $c_p = 2300$ Дж/(кг·К), $k = 0,26$ Вт/(м·К), $A = 2000$ К, $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-2}$ н/м, $\alpha_p = 10^2$ Вт/(м²·К) и $R = 10^{-2}$ м, $H = 10^{-2}$ м, $U_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м/сек. Время релаксации напряжений жидкости изменялось в пределах от $\lambda = 0,1$ до 10 с. Получены следующие значения безразмерных критериев: $Re = 10^{-5}$, $\alpha = 0,33$, $\beta = 0,11$, $Pe = 180$, $Bg = 2 \cdot 10^{-2}$, $Ca = 1,4 \cdot 10^3$, $Bi = 3,8$, а число We изменяется в пределах от 0,1 до 5,0.

На рис. 2 представлена картина течения для насадки с размером выходного канала $L=0$ в виде линий тока (рис. 2,а), изолиний первой разности главных напряжений N_1 (рис. 2,б) и компоненты осевой скорости (рис. 2,в) для изотермической экструзии при $We = 3,0$.

На рис. 2 видно, что, как только полимерная жидкость проходит выходное сечение и попадает в зону свободного течения, давление и напряжения начинают немедленно релаксировать. Процесс релаксации происходит до тех пор, пока накопленная высокоэластичная деформация не уменьшится до значения, соответствующего эластической деформации полимера, находящегося в состоянии стационарного течения. Выделим две основные причины изменения сечения струи:

– перестройка профиля скоростей от параболического, соответствующего течению в канале, к прямоугольному, соответствующему движению струи как сплошного твердого стержня;

– релаксация высокоэластических деформаций растяжения, накопленных в материале струи за время ее прохождения по каналу. Перестройка профиля скорости приводит к возникновению продольных деформаций растяжения или сжатия.

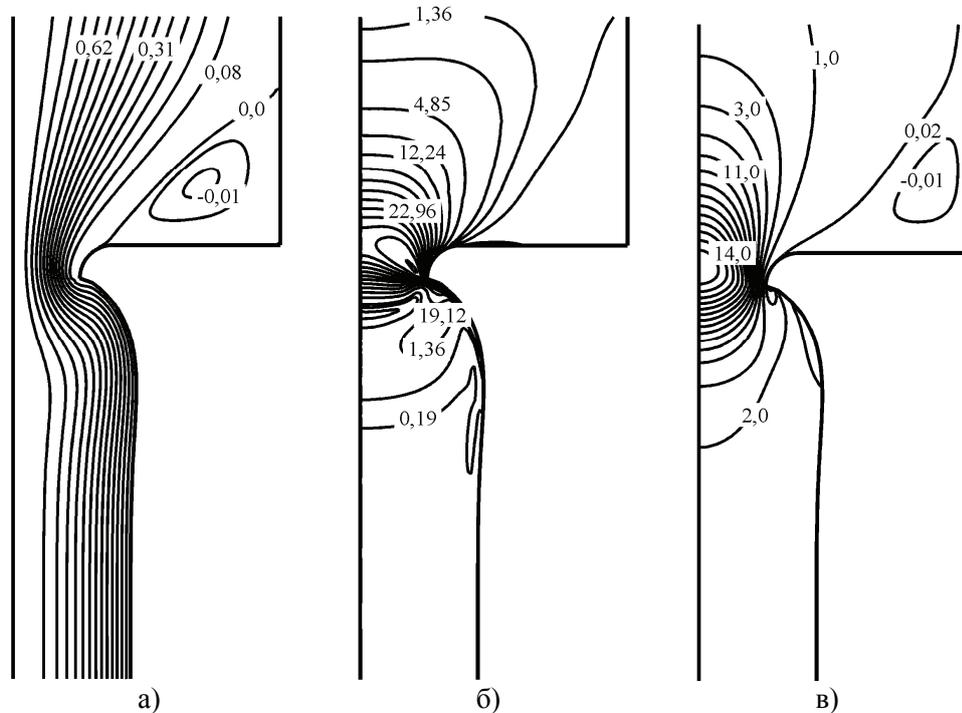


Рис. 2. Линии тока ψ (а), изолинии N_1 (б), изолинии осевой скорости (в) для изотермической экструзии при $We = 3,0$ для насадки с длиной выходной части $L=0$

Из требования выполнения закона сохранения количества движения следует, что струя, выходящая из канала, должна сужаться. Этот эффект известен для низкомолекулярных жидкостей, не проявляющих высокоэластических свойств. Для полимерных систем реализуется упругое разбухание, обусловленное высокоэластическими деформациями. Увеличение диаметра выходной струи характеризуется параметром h_f , равным отношению диаметра выходной струи к диаметру канала и называемым степенью разбухания. На рис. 3 приведена зависимость степени разбухания h_f выходной струи полимерной жидкости от значения параметра We для различных насадок. Формы насадок различаются длиной узкой выходной части L , изменяющейся от 0 до $10h$. Результаты показывают, что степень разбухания h_f струи увеличивается при уменьшении длины выходного участка. Видно, что значения h_f зависят от кинематики предшествующего деформирования – скорости сдвига

и длины выходной части капилляра. Это можно объяснить тем, что экструзионное разбухание при переработке полимеров обусловлено высвобождением упругой энергии, запасенной при предшествующем течении в канале.

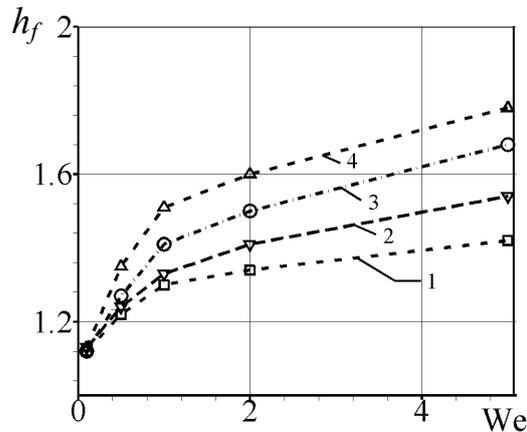


Рис. 3. Степень разбухания выходной струи h_f в зависимости от числа We для различных насадок: 1 – $L=10h$; 2 – $L=4h$; 3 – $L=2h$; 4 – $L=0$

Вязкоупругие жидкости являются средами, обладающими наследственной памятью. Наследственная жидкость «помнит предысторию», т.е. изменение поля скоростей в предшествующие моменты времени. Длительность «памяти» характеризуется временем релаксационных процессов λ , что определяется безразмерным числом Вейсенберга We . Видно, что при увеличении значения числа We степень разбухания увеличивается для всех насадок. На рис. 4 показана зависимость h_f от числа We при неизотермической экструзии для ступенчатой формующей насадки с размером выходной части $L=2h$ в зависимости от температурного напора между стенкой и потоком полимера. Видно, что нагрев стенки на $\Delta T = 30$ К (кривая 3) приводит к уменьшению диаметра выходной струи. Отметим при этом, что для более длинной насадки с ростом числа We и температурного напора наблюдается немонотонный характер увеличения h_f . При небольших числах We ($We < 1$) происходит уменьшение степени разбухания.

Заключение

Приведенные результаты расчетов процесса экструзии вязкоупругой жидкости из ступенчатых формующих насадок с разной длиной выходной части показали, что степень разбухания выходной струи увеличивается для коротких насадок. Полученные результаты подтверждают вывод о том, что одним из факторов, влияющих на степень разбухания, для наследственных вязкоупругих сред является время релаксации напряжений. Неизотермичность потока полимерной массы, определяющаяся разностью температур стенки и основного потока, приводит к уменьшению диаметра выходной струи. Выявлено, что при увеличении температурного напора наблюдается уменьшение диаметра выходной струи с ростом числа We на начальном этапе.

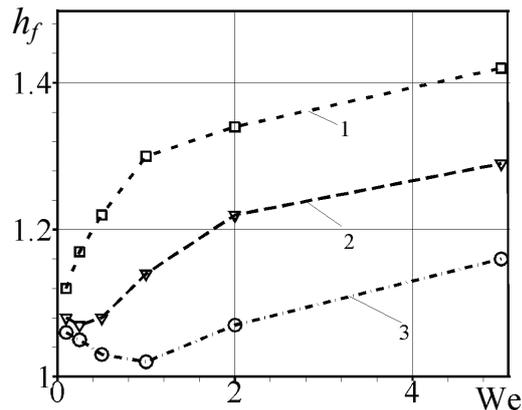


Рис. 4. Степень разбухания выходной струи для неизотермической экструзии в зависимости от числа We для насадки $L=0$ при увеличении температуры стенки S_3 : 1 – $\Delta T=0$ К; 2 – 15 К; 3– 30 К

Данный характер немонотонного поведения степени разбухания свидетельствует о том, что температурная аномалия вязкости оказывает существенное влияние на форму выходящей струи.

Список литературы

1. **Торнер, Р. В.** Теоретические основы переработки полимеров / Р. В. Торнер. – М.: Химия, 1977. – 467 с.
2. **Раувендаль, К.** Экструзия полимеров / К. Раувендаль. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
3. **Giesekus, H.** A simple constitutive equation for polymeric liquids based on the concept of deformation dependent tensorial mobility / H. Giesekus // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1982. – V. 11. – P. 69–109.
4. **Снигерев, Б. А.** Течение упруговязкой жидкости со свободной поверхностью / Б. А. Снигерев, Ф. Х. Тазюков, А. Г. Кутузов, А. М. Раваш // Вестник Казанского технологического университета. – 2007. – № 1. – С. 85–93.

Снигерев Борис Александрович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Учреждение Российской академии наук «Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН»

E-mail: Snigerev@mail.knc.ru

Snigerev Boris Alexandrovich
Candidate of engineering sciences, senior staff scientist, Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Science

УДК 532.517.2:534.2

Снигерев, Б. А.

Математическое моделирование неизотермической экструзии полимерной жидкости из ступенчатой формирующей насадки / Б. А. Снигерев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 196–202.

С. Н. Виноградов, Н. В. Севостьянов

**ИЗНОСОСТОЙКИЕ С НИЗКИМ ЗНАЧЕНИЕМ
ПЕРЕХОДНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ
ПОКРЫТИЯ СПЛАВОМ МЕДЬ-НИКЕЛЬ**

Аннотация. Для сближения потенциалов разряда меди и никеля и осаждения сплава медь-никель предложена комбинация лигандов – сульфосалицилат-ион и аммиак. Исследованы зависимости состава сплавов и выхода по току от состава электролита, катодной плотности тока, температуры и pH электролита. Рассмотрены физико-механические свойства покрытия.

Ключевые слова: сплав, медь-никель, электроосаждение, состав сплава, выход по току, твердость, износостойкость, переходное электросопротивление, внутренние напряжения.

Abstract. In order to put closer the deposition potentials of copper and nickel and electrodeposition of copper-nickel alloy the authors suggest a salicylate-ion and ammonia ligands combination. The article investigates the effects of bath composition, cathode current density, temperature and pH on the composition of deposits and current efficiency. The authors also consider physicomachanical properties of galvanic coating.

Key words: alloy, copper-nickel, electrodeposition, alloy composition, current efficiency, hardness, wear resistance, transient electrical resistance, internal stress.

Введение

Как известно, металлические сплавы и покрытия из них в зависимости от состава обладают различными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

При гальваническом осаждении сплавов состав осадков зависит от параметров процесса электролиза. При изменении режимов осаждения изменяется состав осаждаемого сплава, следовательно, и свойства получаемых покрытий. Таким образом, изменяя режим осаждения, можно получать покрытия с различными физико-механическими свойствами.

Сплав медь-никель обладает рядом ценных свойств в качестве покрытий для конструкционных материалов, расширяя их функциональные возможности и повышая долговечность. В зависимости от состава медноникелевый сплав имеет различные физико-механические свойства. В результате этого покрытие сплавом медь-никель может найти разнообразное применение в промышленности. Так, гальванические покрытия сплавами медь-никель применяются как декоративные и защитные от коррозии во влажной среде [1–3]. Также они используются в качестве покрытий для слаботочных электрических контактов [4–7].

Однако получение гальванических покрытий сплавом медь-никель сопряжено с рядом сложностей. Разность стандартных потенциалов меди и никеля составляет ~0,59 В, в результате чего получение качественных покрытий сплавом весьма затруднено. Кроме того, химическая изоморфность затрудняет подбор лиганда для сближения потенциалов выделения меди и никеля в сплав.

В настоящее время для осаждения сплава в промышленности применяются пирофосфатные электролиты. Они позволяют получать качественные

покрытия сплавом медь-никель [2], однако для комплексообразования меди и никеля расходуется большое количество пирофосфата калия (до 500 г/л), электролит имеет низкую производительность, при работе необходимо осуществлять перемешивание электролита, что вносит нестабильность в работу [8].

С целью преодоления вышеуказанных недостатков в настоящей работе предложено использовать электролит на основе полилигандных соединений – сульфосалициловой кислоты и аммиака [9]. В результате образования смешанных комплексов потенциалы выделения меди и никеля сдвигаются в сторону электроотрицательных значений. Этот сдвиг более резко выражен у меди, что приводит к уменьшению разности потенциалов.

1. Методика эксперимента

Для изучения технологических закономерностей электроосаждения сплава медь-никель использовали стеклянную термостатированную ячейку емкостью 0,25 л. Сплавы осаждали из электролитов, содержащих CuSO_4 7–20 г/л, NiSO_4 50 г/л, Ssal 80 г/л, NH_4OH (водный 30 % раствор) 5–7 мл/л, сахарин 1 г/л. В качестве анодов использовали никелевый и медный пластинчатые аноды. Концентрацию металлов в электролите в процессе работы корректировали по данным химического анализа.

Выход по току определяли кулонометрическим методом. Состав сплава определяли спектрофотометрическим анализом водного раствора методом Фирордта с известными показателями поглощения компонентов [10] на спектрофотометре КФК-3.

Внешний вид покрытий оценивался невооруженным глазом и с помощью стереоскопического микроскопа МБС-9. Исследование топографии поверхности осажденного сплава проводили на образцах с толщиной покрытия 10 мкм на атомно-силовом микроскопе с радиусом закругления сканирующей иглы 20 нм и разрешающей способностью 3 нм. Внутренние напряжения покрытия определяли методом гибкого катода.

Износостойкость измеряли на установке, имитирующей работу ламельного электрического контакта. Образец закрепляется на лотке, который совершает возвратно-поступательные движения относительно бронзового наконечника диаметром 1 мм, давящего на образец с силой 2 Н. Испытания проводилось в условиях сухого трения.

Шероховатость покрытий измеряли по критерию R_a на профилометре Модель-283, построение профилограммы осуществляли на профилографе-профилометре Модель-201, оснащенный пишущим прибором.

Микротвердость покрытий сплавом медь-никель измерялась на микротвердомере ПМТ-3. С целью устранения влияния основы на результат измерения микротвердость измерялась на покрытиях толщиной не менее 20 мкм (ГОСТ 9450–76).

Измерение переходного электросопротивления осуществлялось (ГОСТ Р 51164) с помощью измерительного прибора ИУС-4, оснащенного сферическим позолоченным контактом с диаметром сферического закругления 1,5 мм. Во время измерения переходного сопротивления на контактную пару плавно подавалась нагрузка от 0,1 до 2 Н.

Защитные свойства и коррозионную стойкость покрытий сплавом медь-никель оценивали по результатам климатических испытаний (ГОСТ 9.905–82) в камере влаги ТХ-500. Испытания в камере влаги проводили при относи-

тельной влажности 95–98 % и температуре 40 ± 2 °С. Далее приведены результаты экспериментов и их обсуждение.

2. Эксплуатационные свойства гальванического покрытия сплавом медь-никель

Эксплуатационные характеристики гальванических покрытий определяются рядом основных физико-механических свойств, таких как коррозионная стойкость, износостойкость, твердость, внешний вид, внутренние напряжения и переходное электросопротивление.

Внешний вид покрытия отчасти определяется шероховатостью поверхности, при этом за счет особой структуры поверхности покрытие может оставаться блестящим.

Среднеквадратичное отклонение R_a профиля поверхности покрытия сплавом медь-никель зависит как от толщины (рис. 1), так и от состава покрытия (рис. 2). С увеличением толщины покрытия шероховатость практически линейно возрастает, что связано с накоплением дефектов в покрытии. При толщине покрытия более 20 мкм шероховатость становится заметной невооруженным глазом, однако поверхность остается блестящей.

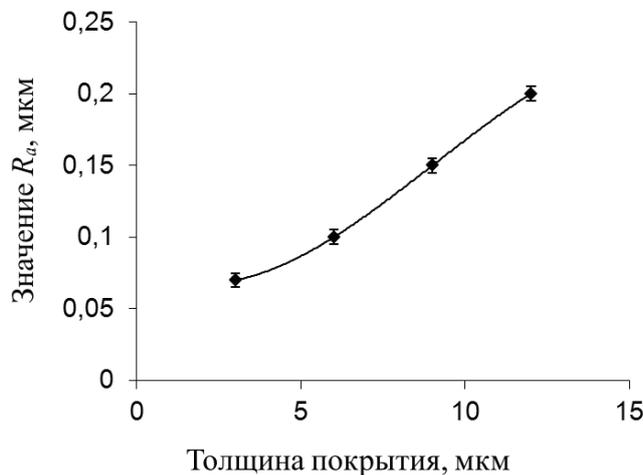


Рис. 1. Шероховатость покрытия сплавом медь-никель в зависимости от толщины

В зависимости от состава осадка шероховатость изменяется нелинейно и имеет область минимума в диапазоне 35–45 % меди. Покрытия такого состава имеют наибольшую отражающую способность.

Покрытия сплавом медь-никель с глянцевой поверхностью и низким значением шероховатости позволяют применять их как декоративные взамен никелевых.

Внутренние напряжения (рис. 3), исследованные методом гибкого катода, показали, что они сильно зависят от состава сплава и изменяются от напряжений сжатия при содержании меди в сплаве выше 60 % к напряжениям растяжения с увеличением доли никеля в сплаве выше 40 %. Однако они остаются сравнительно невысокими и составляют 150–200 МПа, что ниже, чем для чистого никеля.

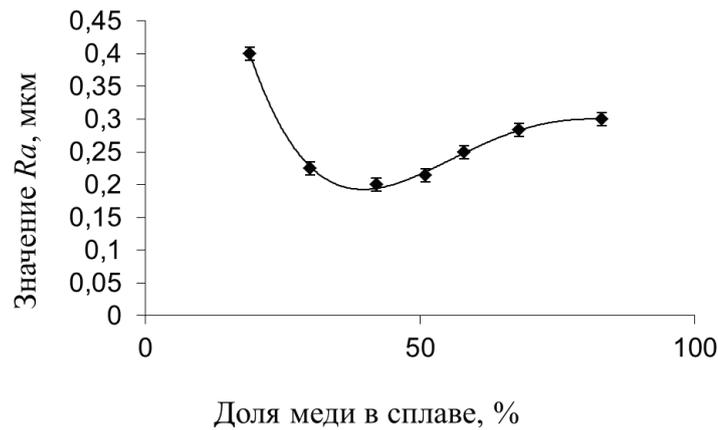


Рис. 2. Шероховатость покрытия сплавом медь-никель в зависимости от состава

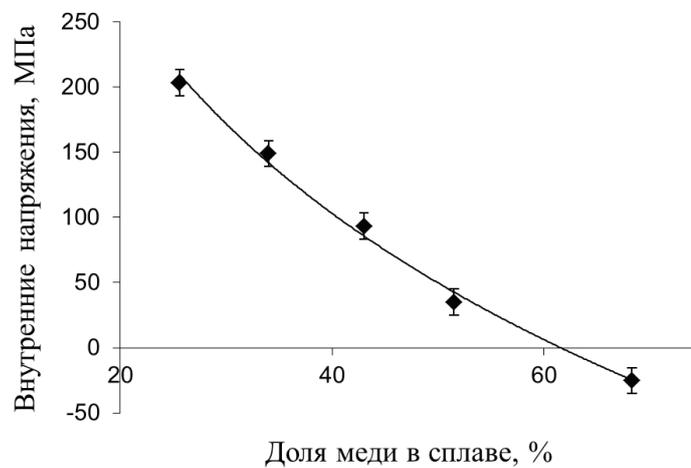


Рис. 3. Зависимость внутренних напряжений покрытий сплавом от состава сплава

Покрывание сплавом медь-никель в области нулевых значений внутренних напряжений имеет блестящий глянцевый вид светлого цвета. Покрытия с низкими значениями внутренних напряжений находят применение в гальванопластике и гальваностегии диэлектриков.

Измеренные на микротвердомере ПМТ-3 значения микротвердости выявили нелинейную зависимость, аналогичную литейному сплаву, от состава сплава (рис. 4). Твердость гальванического никеля на 40 % больше, чем у металлургического сплава, а пик смещен в сторону никеля.

Микротвердость изменяется от 0,36 ГПа для чистой меди до 1 ГПа для чистого никеля. Максимум микротвердости соответствует сплаву состава Ni-70 %мас. и превосходит микротвердость чистого никеля на 15 %.

Как показали испытания (рис. 5), износостойкость сплава превышает износостойкость меди, а высоконикелевый сплав имеет износостойкость выше на 25 % по сравнению с никелем. Такую зависимость износа от состава сплава можно объяснить максимальной твердостью высоконикелевых сплавов.

Сплавы медь-никель обладают низкими и стабильными во времени значениями переходного электросопротивления. Пленка продуктов коррозии

на поверхности сплава имеет более низкое электросопротивление по сравнению с пленками никеля и меди. Переходное электросопротивление покрытия сплавом находится в диапазоне 7,6–12,4 мОм, в зависимости от нагрузки на контакт и состава сплава (рис. 6). Как показали испытания в камере влаги (рис. 7), переходное электросопротивление сплавов медь-никель на основе меди и на основе никеля изменяется менее значительно по сравнению с медью и никелем. Стабильность низкого переходного электросопротивления сплава медь-никель объясняется повышенной коррозионной стойкостью и низким сопротивлением.

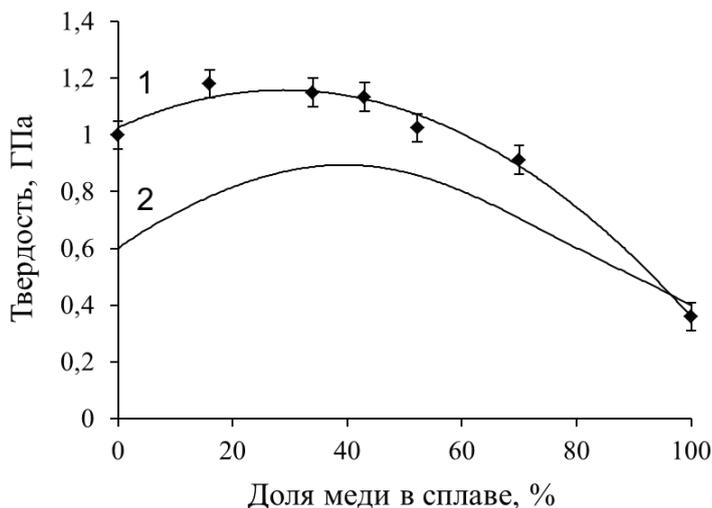


Рис. 4. Зависимость микротвердости покрытия сплавом Cu-Ni от состава: 1 – гальванический сплав медь-никель; 2 – металлургический сплав медь-никель

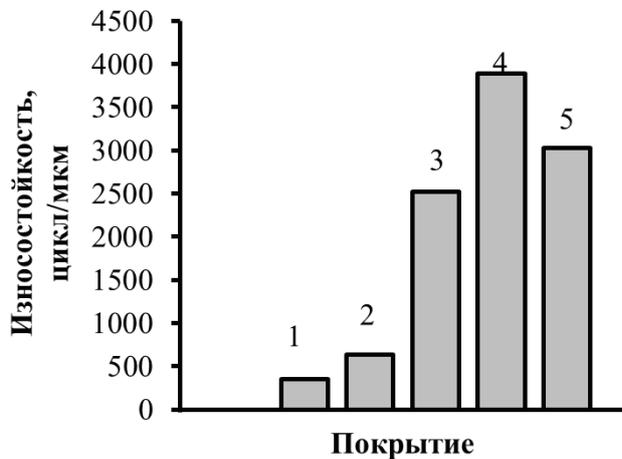


Рис. 5. Износоустойчивость покрытия медью, сплавом медь-никель и никелем: 1 – медь; 2 – сплав медь-никель (52 % Cu); 3 – сплав медь-никель (43 % Cu); 4 – сплав медь-никель (34 % Cu); 5 – никель

Для оценки коррозионной стойкости гальванических покрытий сплавом медь-никель, полученных из сульфосалицилатно-аммиачного электролита,

были проведены климатические испытания по ГОСТ 9.308–85 в камере влаги. Они показали, что гальванические покрытия сплавом медь-никель оцениваются в 4 балла (из 10 возможных). На покрытиях после 56 суток испытаний выявились потускнения поверхности с частичной потерей блеска.

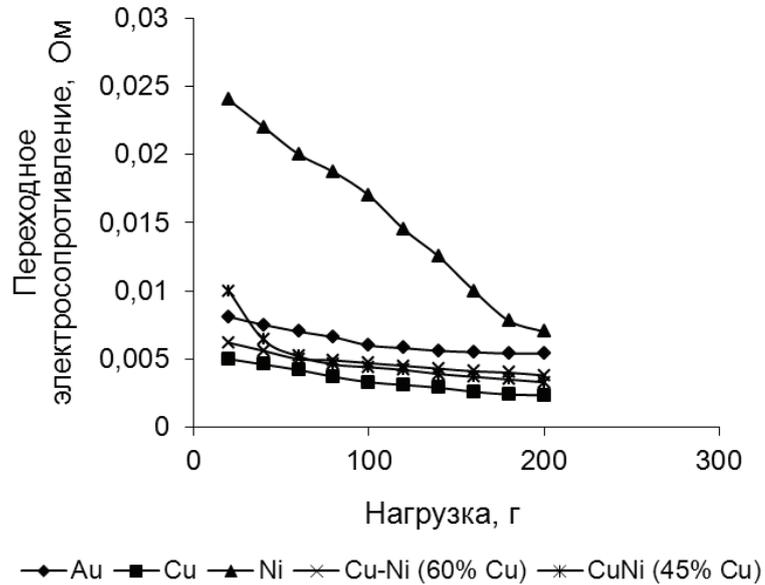


Рис. 6. Зависимость переходного электросопротивления покрытия сплавом Cu-Ni от нагрузки

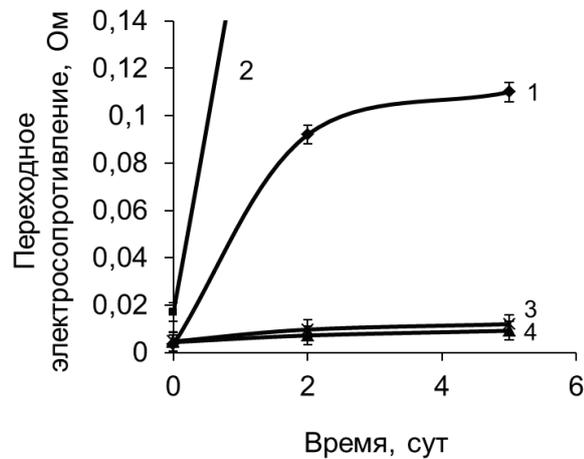


Рис. 7. Изменение переходного электросопротивления меди и сплава медь-никель от продолжительности испытания в камере влаги:
1 – медь; 2 – никель; 3 – сплав медь-никель (60 % Cu);
4 – сплав медь-никель (45 % Cu)

3. Влияние технологических факторов на состав сплава медь-никель

Исследовано влияние основных параметров электролиза (состав, температура и pH электролита и катодная плотность тока) на состав осаждаемого сплава медь-никель и качество внешнего вида покрытия.

Установлено, что с увеличением катодной плотности тока доля меди в сплаве закономерно уменьшается (рис. 8), что связано с большим смещением потенциала медного электрода в сторону отрицательных значений по сравнению со смещением потенциала никелевого электрода в рабочем диапазоне плотностей тока в сульфосалицилатно-аммиачном электролите. Тем самым при увеличении катодной плотности тока увеличивается доля тока, идущая на разряд ионов никеля, что приводит к изменению состава сплава. Выход по току в рабочем диапазоне плотностей токов не ниже 88 %. Глянцевые покрытия сплавом осаждаются при плотности тока 1,5–2,5 А/дм². При плотности тока меньше 1,0 А/дм² покрытия имеют матовый вид. С увеличением катодной плотности тока свыше 3,0 А/дм² в результате выделения водорода качество внешнего вида покрытия ухудшается.

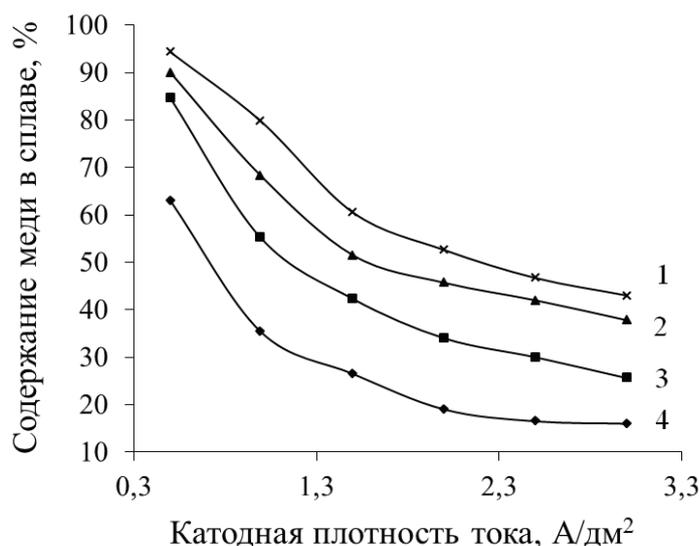


Рис. 8. Зависимость содержания меди в сплаве от катодной плотности тока при содержании CuSO_4 в электролите (г/л): 1 – 7; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20

Увеличение концентрации ионов меди в электролите от 7 до 20 г/л ($\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$) при концентрации никеля 50 г/л ($\text{NiSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) и температуре электролита 50 °С приводит к росту доли меди в сплаве (рис. 9) во всем интервале плотностей тока. Такая зависимость связана со смещением потенциала выделения сплава в сторону положительных значений в результате деполяризующего действия более электроположительных ионов меди при электроосаждении сплава. Увеличение концентрации ионов меди в электролите также ведет к росту выхода по току.

Изменение концентрации ионов никеля в электролите незначительно влияет на состав катодных осадков.

Состав сплавов, выход по току и внешний вид покрытий зависят от температуры электролита. Увеличение температуры электролита приводит к увеличению содержания меди в сплаве и увеличению выхода по току во всем интервале плотностей токов. Блестящие глянцевые покрытия осаждаются в интервале температур 40–55 °С.

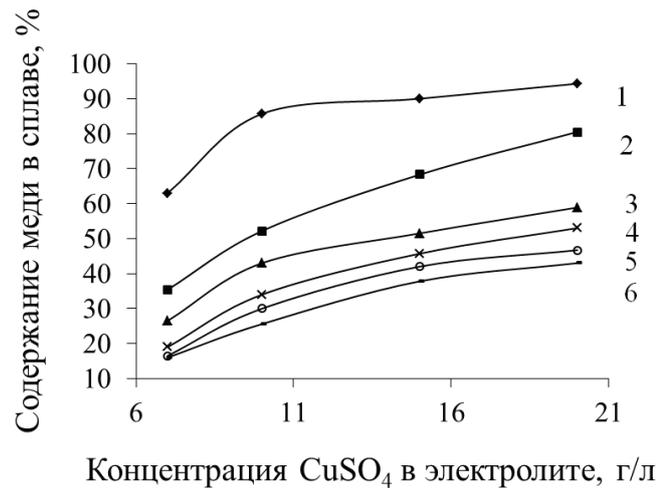


Рис. 9. Зависимость содержания меди в сплаве от концентрации меди в электролите при катодных плотностях тока (А/дм²): 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2,0; 5 – 2,5; 6 – 3,0

Состав сплавов незначительно зависит от рН электролита в рабочем диапазоне. Увеличение рН электролита свыше 7,5 приводит к незначительному уменьшению выхода по току, что может быть обусловлено образованием более прочных комплексных соединений меди и никеля. Блестящие покрытия сплавом осаждаются при рН 6,5–7,5.

При изменении режимов осаждения изменяется состав осаждаемого сплава, следовательно, и свойства получаемых покрытий. Таким образом, изменяя режим осаждения, можно получать покрытия с различными физико-механическими свойствами.

В данном случае имеется пять факторов, которые могут изменяться или быть изменены в процессе электролиза: катодная плотность тока, концентрация ионов меди и никеля в электролите, рН и температура электролита.

Так как на состав сплава практически не влияет рН электролита и слабо влияет концентрация ионов никеля в электролите, то факторное пространство сокращается до трех наиболее значащих факторов: катодная плотность тока i , концентрация ионов меди в электролите C_{Cu} и температура электролита t .

После вычисления коэффициентов уравнения и представления в натуральных координатах расчетная зависимость доли меди в сплаве имеет вид

$$Y = -199,34 - 47,91i + 8,03t + 11,33C_{Cu} - 0,0764tC_{Cu} + 8,72i^2 - 0,0647t^2 - 0,2C_{Cu}^2. \quad (1)$$

Полученная расчетная зависимость позволяет определить долю меди в сплаве при заданных технологических факторах или выбрать точку из плоскости факторного пространства (рис. 10), построенного по найденному уравнению, с целью задания необходимых технологических параметров процесса электролиза.

Например, твердое и износостойкое покрытие обеспечивается при содержании меди в сплаве 35 %. Такой состав сплава можно обеспечить варьи-

рованием катодной плотности тока и температуры электролита (1). То есть имеется совокупность значений технологических режимов, при которых можно обеспечить необходимый эксплуатационный результат. Дальнейшая оптимизация технологического процесса осаждения определяется из дополнительных эксплуатационных (внешний вид) или производственных (экономика электроэнергии, скорость процесса) условий.

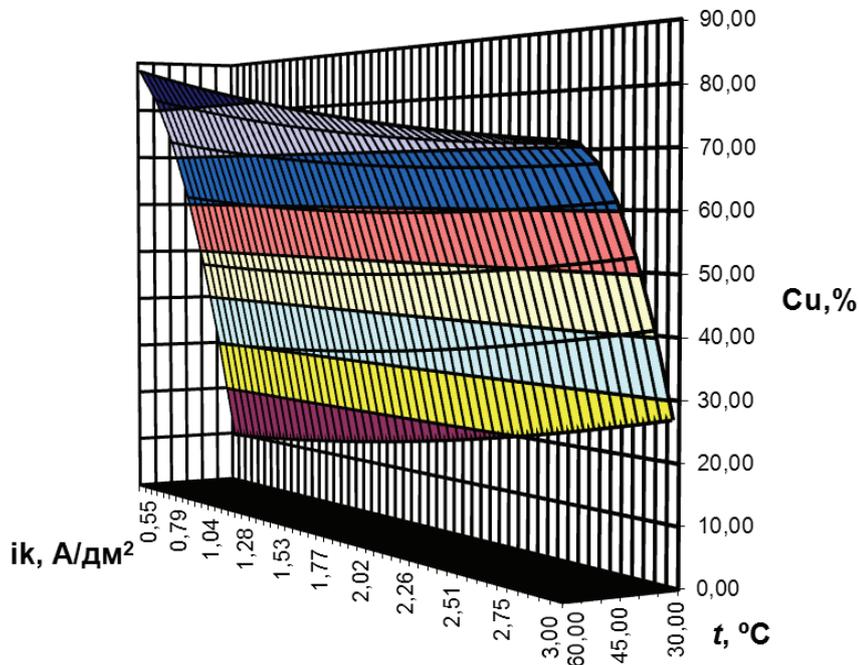


Рис. 10. Сечение трехфакторного пространства при содержании меди в электролите 10 г/л в координатах катодной плотности тока и температуры электролита для доли меди в сплаве

Заключение

Разработанный электролит позволяет осаждать блестящие, износостойкие покрытия с низким значением переходного электросопротивления. Покрытие медно-никелевым сплавом можно применять не только в традиционных областях защиты от коррозии, но и для декоративных целей. Низкие и стабильные значения переходного электрического сопротивления и высокие значения износостойкости позволяют использовать покрытие данным сплавом для слаботочных электрических контактов.

Список литературы

1. **Вячеславов, П. М.** Электролитическое осаждение сплавов / П. М. Вячеславов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленинг. отд-ние, 1986. – 112 с.
2. **Федотьев, Н. П.** Электролитические сплавы / Н. П. Федотьев, Н. Н. Бибииков, П. М. Вячеславов, С. Я. Грилихес. – М. : Машиностроение, 1962. – 312 с.
3. **Bayliss, D. A.** Steelwork Corrosion Control / D. A. Bayliss, D. H. Deacon – Spon Press. – Second edition. – 2002. – 420 p.

4. **Ясевич, В. И.** Исследование электроосаждения медно-никелевого покрытия на контакт-детали герконов / В. И. Ясевич, С. М., Карабанов, О. Г. Локштанова, Л. В. Шишкина // Вестник Рязанского ГРТУ. – 2008. – № 3. – С. 64–68.
5. **Пурин, Б. А.** Электроосаждение металлов из пиррофосфатных электролитов / Б. А. Пурин. – Рига : Знание, 1975. – 196 с.
6. **Шишкина, Л. В.** Электролитические покрытия контактных систем с применением барьерных слоев на основе сплавов медь-никель, кобальт-вольфрам и никель-молибден / Л. В. Шишкина, С. М. Карабанов, О. Г. Локштанова // Вестник Рязанского ГРТУ. – 2009. – № 3 (29). – С. 53–57.
7. **Вячеславов, П. М.** Применение гальванических покрытий для электрических контактов, работающих на истирание / П. М. Вячеславов, Е. Г. Круглова, Р. Р. Фредель. – Л. : Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1959. – 12 с.
8. **Харламов, В. И.** Особенности формирования микрорельефа гальванических сплавов медь-кобальт, медь-никель / В. И. Харламов, О. М. Белоус, Н. С. Григорян, В. В. Терехова, Т. А. Ваграмян // Электрохимия. – 1997. – Т. 33, № 1. – С. 85–87.
9. Пат. 2365683 Российская Федерация, МПК C25D 3/58. Сульфосалицилатный электролит для осаждения сплава медь-никель / Виноградов С. Н. (Россия), Севостьянов Н. В. (Россия) ; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный университет. – № 2008138832/02; Заяв. 30.09.2008; Оpubл. 27.08.2009; Бюл. № 24. – 5 с.
10. **Булатов, М. И.** Практическое руководство по фотоколориметрическим и спектрофотометрическим методам анализа / М. И. Булатов, И. П. Калинин. – М. : Химия. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – 384 с.

Виноградов Станислав Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки, кафедра
технологии машиностроения,
Пензенский государственный
университет

E-mail: hms@pnzgu.ru

Vinogradov Stanislav Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
honoured scientist, sub-department
of mechanical engineering,
Penza State University

Севостьянов Николай Владимирович

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: kolia-phone@mail.ru

Sevostyanov Nikolay Vladimirovich

Postgraduate student,
Penza State University

УДК 621.357.7

Виноградов, С. Н.

Износостойкие с низким значением переходного электросопротивления покрытия сплавом медь-никель / С. Н. Виноградов, Н. В. Севостьянов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 203–212.

УДК 658.56

*И. И. Артемов, В. Д. Кривчик, С. Б. Меньшова, В. В. Келасьев***МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ
В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЛИСТА РЕССОРЫ**

Аннотация. Предложен теоретический подход к описанию процесса фреттинг-коррозии применительно к пакету листовой рессоры. Подход основан на рассмотрении процесса дислокационной ползучести, инициированной температурой контакта и нормальным напряжением в зоне абразивного действия. Показано, что для кривых зависимости длины микротрещины от времени развития процесса фреттинг-коррозии характерен излом, связанный со сменой механизма «подрастания» клиновидной полости за счет дислокационного скопления на механизм развития микротрещины, обусловленного ростом размера каверн и нормального напряжения.

Ключевые слова: фреттинг-коррозия, дислокационная ползучесть, абразивное действие, дислокационное скопление, клиновидная полость, микротрещина.

Abstract. The article suggests a theoretical approach to the fretting – corrosion description with respect to the leaf springs block. This approach is based on consideration of the dislocation creep process, which is stimulated by the contact temperature and normal stress in the range of abrasive action. It is shown, that the curves demonstrating dependence between the microcracks length and the period of the fretting – corrosion process development are characterized by a fracture, caused by the substitution of the mechanism of wedge-shaped cavity “growth” due to dislocation arrays, by the mechanism of microcracks growth. The substitution is caused by increase of cavity size and normal stress rate.

Key words: fretting – corrosion, dislocation creep, abrasive action, dislocation arrays, wedge – shaped cavity, microcracks.

Введение

Проблема повышения долговечности деталей машин в последние годы вышла за рамки только конструкционных решений и рассматривается также с позиции дефектной структуры материала [1, 2]. Это особенно важно в случае развития фреттинг-коррозии (Ф-К), возникающей при колебательном относительном движении контактирующих поверхностей. Такое движение может быть вызвано вибрациями, возвратно-поступательными движениями с относительно малыми перемещениями. При Ф-К значительно ухудшается качество контактирующих поверхностей, появляются повышенная шероховатость, каверны и поверхностные микротрещины (МТ), что приводит к существенному снижению усталостной прочности поверхностных слоев деталей. Так, например, установлено, что 28 % отказов пакетов листовых рессор связано с повреждениями от Ф-К, которые возникают в замковом соединении – соединении нижнего листа рессоры (ЛР) с верхним по концам или в области стяжного болта. Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствует последовательная теория Ф-К, основанная на представлениях о дефектной структуре материала. Существующие подходы апеллируют к экспериментально-аналитическим методам качественной оценки данного процесса [3, 4]. Цель настоящей работы состоит в развитии теоретического подхода к описанию процесса Ф-К в пакете листовой рессоры на основе рассмотрения дислокационной ползучести, инициированной периодически изменяющейся темпе-

ратурой контакта, а также нормальной составляющей механического напряжения в зоне абразивного действия за счет поперечных колебаний верхней пластины. Как будет показано ниже, предлагаемый подход позволяет описать процесс образования МТ, а также исследовать ее длину как функцию частот продольных и поперечных колебаний ЛР, параметров дислокаций, коэффициентов диффузии зон Коттрелла и вакансий, времени развития Ф-К, относительной деформации поперечных колебаний ЛР.

В разд. 1 данной статьи в рамках поставленной соответствующей краевой задачи проводится расчет локальной температуры в контакте в условиях периодических продольных смещений верхнего и нижнего ЛР. Локальная температура возникает вследствие механических взаимодействий соприкасающихся поверхностей, в результате которых происходит разрушение микровыступов с последующим атмосферным окислением поверхности и продуктов разрушения. Наличие поперечных колебаний ЛР приводит к росту нормальной составляющей механического напряжения в зоне абразивного действия. В разд. 2 проведен расчет поперечных колебаний верхнего ЛР под действием равномерно распределенной поперечной силы и исследована координатная зависимость поперечных смещений вблизи резонанса. Локальная температура в контакте и поперечные смещения инициируют дислокационную ползучесть за счет диффузионного расплывания зон Коттрелла. В рамках механизма переползания дислокаций с атмосферами Коттрелла в разд. 3 данной статьи установлена связь линейной плотности дислокаций со скоростью диффузионной ползучести. Движущиеся с атмосферами Коттрелла дислокации могут скапливаться перед некоторым препятствием в виде примесных включений или границ зерен. Скопление создает на головной дислокации большую концентрацию силы, пропорциональную приложенному напряжению и числу дислокаций в скоплении. Когда скопление содержит достаточно большое число дислокаций, под действием внешнего напряжения в голове скопления могут возникнуть напряжения порядка теоретической прочности на сдвиг, в результате чего скопление может зародить МТ.

В разд. 3 статьи в модели Стро [5] проводится расчет числа дислокаций в скоплении и длины МТ.

1. Расчет локальной температуры в контакте

Рассмотрим механизм возникновения локальной температуры в процессе развития Ф-К. Под действием сил трения кристаллическая решетка поверхностных слоев при циклических тангенциальных смещениях разрушается. При этом процесс разрушения представляет собой диспергирование поверхности без удаления продуктов износа. Оторвавшиеся частицы металла подвергаются быстрому окислению. Вследствие малой амплитуды смещений удаление продуктов износа из зоны трения затруднено, и повреждения при Ф-К сильно локализованы на площадках контакта [3]. На поверхностях контактов, подверженных Ф-К, возникают схватывание, микрорезание, а также усталостное разрушение микрообъемов металла, сопровождающееся возникновением локальной температуры в фактическом контакте. На рис. 1 в упрощенном виде представлена рассматриваемая ситуация: первоначальное контактирование происходит в отдельных точках поверхности (рис. 1,а) далее при вибрации окисные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные абразивом (рис. 1,б).

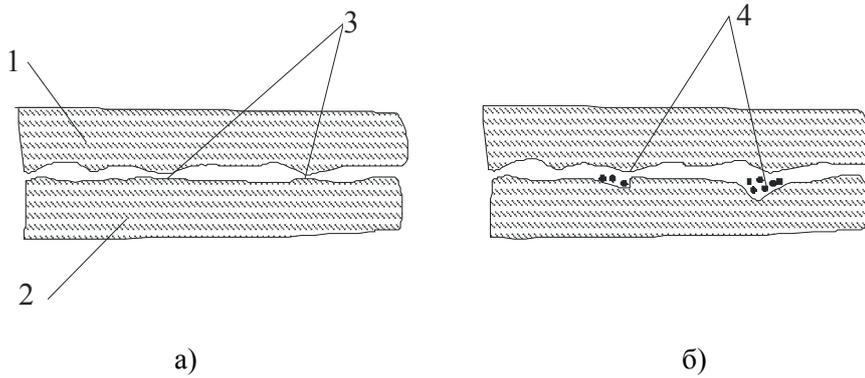


Рис. 1. Механизм зарождения каверн, заполненных абразивом, при Ф-К:
1, 2 – контактирующие элементы детали; 3 – точки контакта поверхностей;
4 – мелкие зарождающиеся каверны

Для определения локальной температуры в контакте $T(x, t)$ рассмотрим следующую краевую задачу:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} T(-l, t) = \Delta T \cdot \sin \omega_1 t + T_0, \\ T(l, t) = \Delta T \cdot \sin \omega_1 t + T_0, \\ T(x, 0) = T_0, \end{cases} \quad (2)$$

где a^2 – коэффициент температуропроводности; ω_1 – частота горизонтальных смещений пластин; $d = 2l$ – толщина пластины; T_0 – начальная температура; $\Delta T = 3 \cdot l_1 l_2 d \omega_1^2 s^2 / (32 \pi^3 c R^3)$ – амплитуда локального изменения температуры (которую можно получить из закона сохранения энергии); c – удельная теплоемкость материала пластин; S – величина относительного перемещения пластин; R – радиус каверны; l_1 – длина и l_2 – ширина пластины (ось x направлена перпендикулярно плоскости пластины).

Решение задачи (1), (2) с использованием теоремы Дюамеля [6] можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{T(x, t)}{T_0} = A \left[\frac{\Delta T}{T_0} \sin(\omega_1 t + \varphi) + 1 \right] + 4\pi a^2 \frac{\Delta T}{T_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n+1) 4l^2 \omega_1}{16l^4 \omega_1^2 + a^4 \pi^4 (2n+1)^4} \times \\ \times \exp \left[-\frac{a^2 (2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right] \cos \frac{\pi(2n+1)}{2l} x, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$A = \left(\frac{\operatorname{ch} 2k^* x + \cos 2k^* x}{\operatorname{ch} 2k^* l + \cos 2k^* l} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$\varphi = \arg \left(\frac{\operatorname{ch} k^* x (1+i)}{\operatorname{ch} k^* l (1+i)} \right), \quad (5)$$

$$k^* = \left(\frac{\omega_1}{2a^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Первое слагаемое в (3) представляет собой решение для установившегося периодического состояния, второе слагаемое – для неустановившегося состояния. Величины A и φ представляют собой амплитуду и фазу установившегося колебания температуры в точке x . Как показали оценки, с ошибкой менее 1 % можно ограничиться первым членом ряда в (3). На рис. 2 представлена зависимость контактной температуры $T(x, t)/T_0$ (в относительных единицах) от x/l (рис. 2,а) и времени развития процесса Ф-К (рис. 2,б) для разных значений частоты продольных смещений ω_1 пластины.

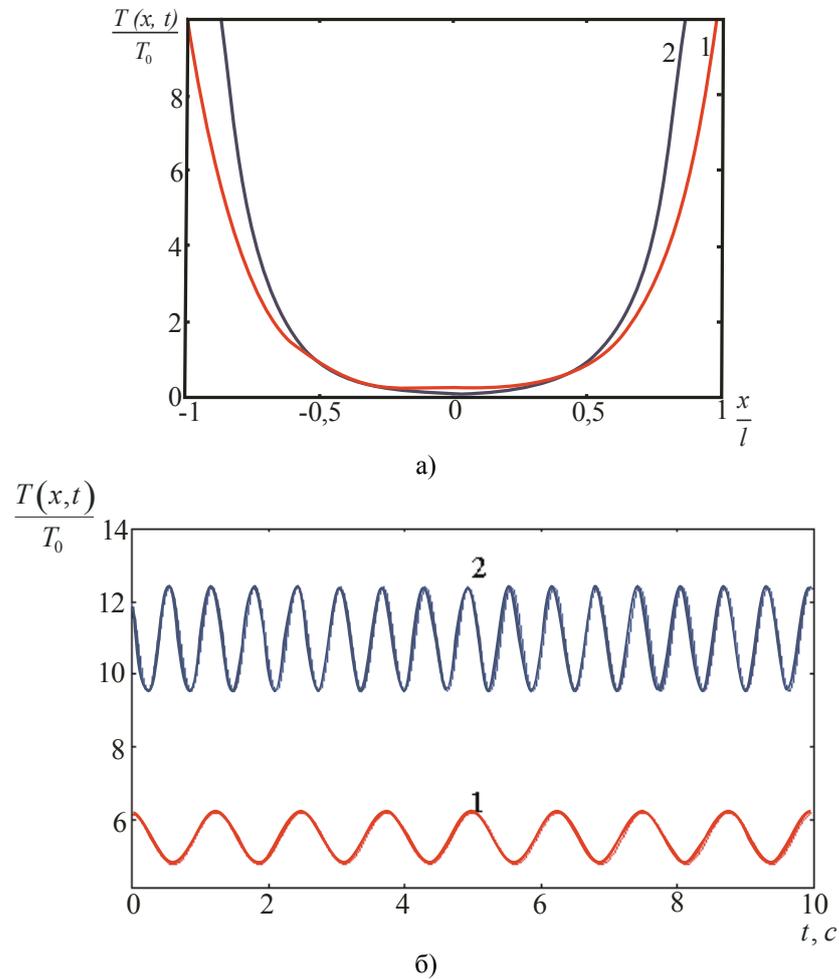


Рис. 2. Зависимость контактной температуры $T(x, t)/T_0$ (в относительных единицах):
 а – от x/l для разных ω_1 : 1 – 5 c^{-1} ; 2 – 10 c^{-1} ; б – от t для разных ω_1 :
 1 – 5 c^{-1} ; 2 – 10 c^{-1} при $x/l = 7/8$

Как видно из рис. 2,б, локальная температура в контакте представляет собой периодическую функцию времени, что является следствием возвратно-поступательного движения пластины, при котором разрушаются окисные пленки и микровыступы на ее контактирующих поверхностях.

В результате локальная температура вблизи контактирующих поверхностей пластины существенно возрастает (рис. 2,а). Можно также видеть, что $T(x, t)/T_0$ растет с ростом частоты ω_1 горизонтальных смещений пластины (ср. кривые 1 и 2 на рис. 2,а), что связано с увеличением работы силы трения. Таким образом, повышение частоты перемещений ускоряет изнашивание, но когда соответствующий период колебаний $T = 2\pi/\omega_1$ становится меньше времени, например, окислительных процессов, рост скорости изнашивания может прекратиться.

2. Расчет поперечных колебаний одной из пары контактирующих пластин под действием равномерно распределенной поперечной силы

Учет поперечных колебаний пластин листовой рессоры важен, поскольку небольшие каверны, заполненные абразивом, с течением времени постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну. В такой каверне повышение давления обусловлено двумя факторами: за счет роста числа окисленных частиц металла (абразива) и за счет наличия нормальной составляющей механического напряжения, связанного с поперечными колебаниями пластин.

Для расчета поперечных колебаний одной из пары контактирующих пластин листовой рессоры использовалась модель равномерно распределенной поперечной силы с плотностью $F(t) = F_0 \cdot \sin \omega_2 t$, где $F_0 = \text{const}$ – амплитуда силы, ω_2 – частота поперечных колебаний. В результате приходим к следующей краевой задаче о вынужденных поперечных колебаниях пластины:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = b_0^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{F_0}{\rho_s} e^{-i\omega_2 t}; \quad (7)$$

$$\begin{cases} U(0, y, t) = U(l_1, y, t) = 0, \\ U(x, 0, t) = U(x, l_2, t) = 0, \\ U(x, y, 0) = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $b_0 = \sqrt{T_0/\rho_s}$; ρ_s – поверхностная плотность материала пластины; T_0 – сила поверхностного натяжения, действующая на пластину; x, y – оси в плоскости пластины.

Искомое решение $u(x, y, t)$ определится как

$$u(x, y, t) = \text{Im} U(x, y, t). \quad (9)$$

Решение уравнения (7) ищем в виде

$$U(x, y, t) = V(x, y) \cdot e^{-i\omega_2 t}. \quad (10)$$

Тогда для определения функции $V(x, y)$ получаем следующую краевую задачу:

$$\Delta V + \frac{\omega_2^2}{b_0^2} V = -\frac{F_0}{\rho_s b_0^2}; \quad (11)$$

$$V|_{x=0} = V|_{x=l_1} = V|_{y=0} = V|_{y=l_2} = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения (11), удовлетворяющее однородным граничным условиям (12), ищем в виде ряда Фурье:

$$V(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{l_1} \sin \frac{n\pi y}{l_2}, \quad (13)$$

где A_{mn} – соответствующие коэффициенты Фурье-разложения.

Используя соотношения (9), (10) и (13), решение рассматриваемой краевой задачи можно представить в виде

$$U(x, y, t) = -\frac{16F_0}{\pi^2 \rho} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\omega_2^2 + \omega_{mn}^2) \sin \omega_2 t}{(2m+1)(2n+1)(\omega_2^2 - \omega_{mn}^2)^2} \sin \frac{m\pi x}{l_1} \sin \frac{n\pi y}{l_2}, \quad (14)$$

где

$$\omega_{mn} = \pi b_0 \sqrt{\frac{m^2}{l_1^2} + \frac{n^2}{l_2^2}}. \quad (15)$$

Ряды в (14), как показали оценки, достаточно быстро сходятся, и с ошибкой, не превышающей 2 %, можно положить $m = n = 1$, тогда

$$\frac{U(x, y, t)}{U_0} = -\frac{(1 + \omega_2^2 / \omega_{11}^2)}{(\omega_2^2 / \omega_{11}^2 - 1)^2} \sin \omega_2 t \sin \frac{\pi x}{l_1} \sin \frac{\pi y}{l_2}, \quad (16)$$

где $U_0 = 16F_0 / (9\pi^2 \rho \omega_{11}^2)$.

На рис. 3 приведена координатная зависимость поперечных смещений одной из пары контактирующих пластин $U(x, y, t) / U_0$ для разных значений величины ω_2 / ω_{11} . Можно видеть, что вблизи резонанса амплитуда смещения увеличивается более чем на порядок (ср. рис. 3,а и 3,б). Помимо абразивного действия, это может привести к существенному росту нормальной составляющей механического напряжения и, соответственно, давления. С увеличением давления скорость изнашивания при Ф-К возрастает. Этот рост при повышении давления обусловлен увеличением площади контакта, поражаемой коррозией [7].

3. Механизм зарождения микротрещины

В процессе осциллирующих горизонтальных и вертикальных перемещений пластин листовой рессоры изменение контактного давления может существенно увеличить скорость износа за счет образования МТ. Действительно, локальная температура в контакте и поперечные смещения инициируют дислокационную ползучесть за счет диффузионного расплывания зон

Коттрелла [2]. В результате вблизи поверхности пластин может увеличиться линейная плотность дислокаций $\rho(x, t)$, связь которой со скоростью диффузионной ползучести дается соотношением вида

$$\rho(x, t) = \frac{2(1-\nu)\sigma_0}{\pi\mu b} \cdot \frac{2R_0}{\sqrt{(x-v_d t)^2 + 4R_0^2}}, \quad (17)$$

где R_0 – радиус ядра дислокации; $v_d = 4D / R_0$ – скорость диффузионной ползучести; μ – модуль сдвига; ν – число Пуассона; b – вектор Бюргера дислокации; σ_0 – амплитуда нормального напряжения.

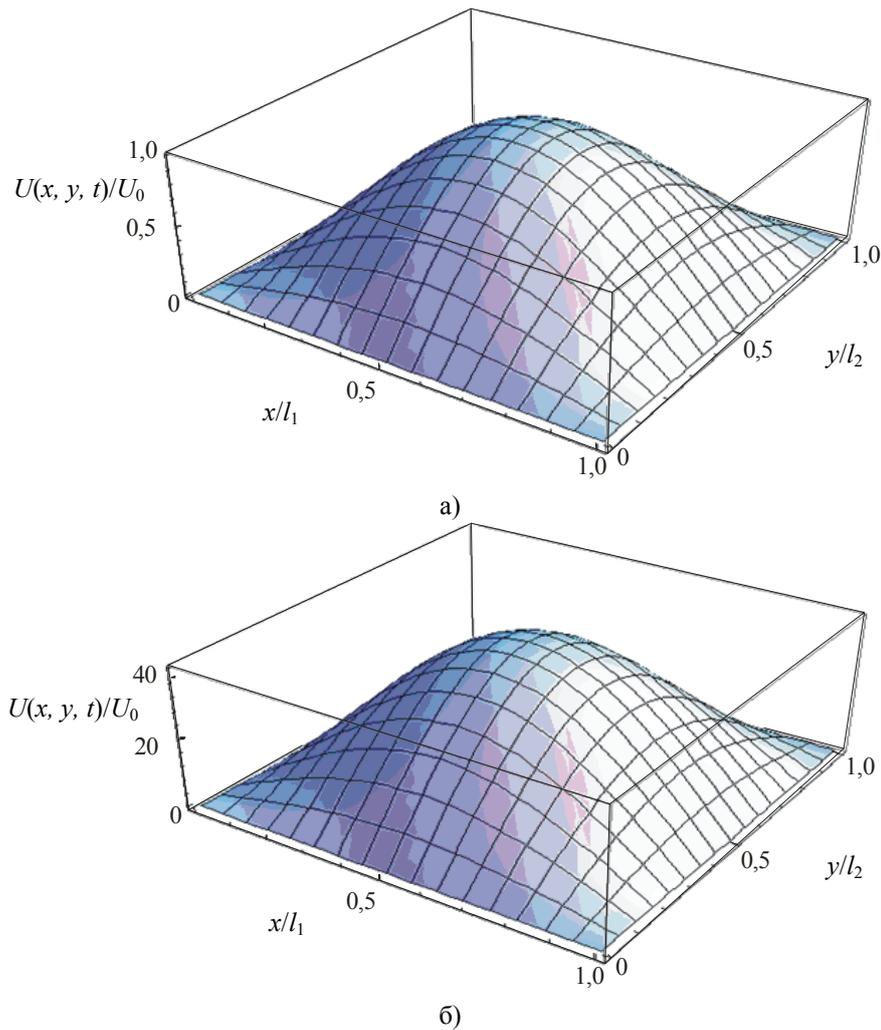


Рис. 3. Координатная зависимость поперечных смещений одной из пары контактирующих пластин $U(x, y, t)/U_0$ (в относительных единицах) для разных значений величины ω_2/ω_{11} : а – 0,1; б – 0,9

При этом коэффициент диффузии D примеси из атмосферы Коттрелла зависит от локальной температуры контакта $T(x, t)$ и определяется процессом генерации вакансий:

$$D = D_T + \Delta D, \quad (18)$$

где ΔD – приращение коэффициента диффузии за счет генерации вакансий [8]:

$$\Delta D = \Delta n_v \cdot D_v = \frac{l' N_0 \Delta V}{b^2} \varepsilon \cdot D_v, \quad (19)$$

где Δn_v – число избыточных вакансий; D_v – коэффициент диффузии вакансий; l' – предельное расширение дислокационных петель; N_0 – плотность фиксированных дислокаций перед деформацией; b – вектор Бюргера дислокации; ΔV – атомный объем; ε – относительная деформация, возникающая при поперечных колебаниях пластин листовой рессоры,

$$\varepsilon = \frac{1}{l_1 l_2} \iint_S dx dy \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + 1} - 1, \quad (20)$$

здесь $U(x, y, t)$ определяется формулой (16); S – площадь поверхности пластины.

С учетом (16) соотношение (20) можно представить в виде

$$\varepsilon = \frac{1}{l_1 l_2} \int_0^{l_1} dx \int_0^{l_2} dy \sqrt{A^2 \frac{\pi^2}{l_1^2} \cos^2 \frac{\pi x}{l_1} \sin^2 \frac{\pi y}{l_2} + A^2 \frac{\pi^2}{l_2^2} \sin^2 \frac{\pi x}{l_1} \cos^2 \frac{\pi y}{l_2} + 1} - 1, \quad (21)$$

где

$$A = U_0 \frac{(1 + \omega_2^2 / \omega_{11}^2)}{(\omega_2^2 / \omega_{11}^2 - 1)^2} \cdot \sin \omega_2 t. \quad (22)$$

Интегрирование по y в (21) дает

$$I_1 = \int_0^{l_2} dy \sqrt{B - C \cos \frac{2\pi y}{l_2}} = \frac{2l_2}{\pi} \sqrt{\frac{\pi^2}{2l_1^2} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{l_1}\right) + \frac{1}{A^2}} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, r_1\right), \quad (23)$$

где $E\left(\frac{\pi}{2}, r_1\right)$ – эллиптический интеграл второго рода [9];

$r_1 \approx 2 \cdot \arcsin(\pi|A| / \sqrt{l_1^2 + \pi^2 A^2}) / \pi$; величины B и C определены как

$$B = \frac{\pi^2}{4l_1^2} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{l_1}\right) + \frac{\pi^2}{4l_2^2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l_1}\right) + \frac{1}{A^2}; \quad (24)$$

$$C = \frac{\pi^2}{4l_1^2} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{l_1}\right) - \frac{\pi^2}{4l_2^2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l_1}\right). \quad (25)$$

Интеграл по x в (21) можно представить в виде

$$I_2 = \int_0^{l_1} dx \sqrt{\frac{\pi^2}{2l_1^2} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{l_1}\right) + \frac{1}{A^2}} = \frac{2}{\pi} \frac{\sqrt{\pi^2 A^2 + l_1^2}}{A} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, r_2\right), \quad (26)$$

где $r_2 = \frac{\pi A}{\sqrt{l_1^2 + \pi^2 A^2}}$.

С учетом (23) и (26) соотношение (20) можно переписать в виде

$$\varepsilon = \frac{4E\left(\frac{\pi}{2}, r_1\right) \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, r_2\right)}{\pi^2} \sqrt{\pi^2 \frac{A^2}{l_1^2} + 1} - 1. \quad (27)$$

Подставляя (27) в (19), для скорости диффузионной ползучести получим

$$v_d = \frac{4}{R_0} \left[D_T + \frac{l' \cdot N_0 \cdot \Delta V}{b^2} D_v \left(\frac{4}{\pi^2} E\left(\frac{\pi}{2}, r_1\right) \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, r_2\right) \sqrt{\frac{\pi^2 A^2}{l_1^2} + 1} - 1 \right) \right]. \quad (28)$$

В области скопления из N дислокаций может возникнуть устойчивая полость величиной $L = N^2 \cdot b$, которая является источником зарождения МТ. Число дислокаций N определяется как

$$N = \int_{-l^*/2}^{l^*/2} \rho(x, t) dx, \quad (29)$$

где l^* – длина дислокационного скопления.

Учитывая (17), для N будем иметь

$$N = \frac{2(1-\nu)\sigma_0}{\pi\mu \cdot b} 2R_0 \ln \left[\frac{\frac{(l^*/2 - v_d t)}{2R_0} + \sqrt{\frac{1}{4R_0^2} \left(\frac{l}{2} - v_d t\right)^2 + 1}}{\sqrt{\frac{1}{4R_0^2} \left(\frac{l}{2} + v_d t\right)^2 + 1} - \frac{1}{2R_0} \left(\frac{l}{2} + v_d t\right)} \right]. \quad (30)$$

При этом длина МТ определяется как

$$L = L_0 \cdot \ln^2 \left[\frac{(0,5l^* - v_d t) / (2R_0) + \sqrt{(0,5l^* - v_d t)^2 / (4R_0^2) + 1}}{\sqrt{(0,5l^* + v_d t)^2 / (4R_0^2) + 1} - (0,5l^* + v_d t) / (2R_0)} \right], \quad (31)$$

где $L_0 = 4(1-\nu)^2 \cdot 4R_0^2 (\sigma_0 / \mu)^2 / b$.

Длину дислокационного скопления можно найти из условия Гриффита [8], согласно которому величина амплитуды нормального напряжения, необходимая для роста МТ, должна удовлетворять следующему неравенству:

$$\sigma_0 \geq \left[\frac{8\mu\gamma}{\pi(1-\nu)} \right]^{1/2} \cdot l^{*-1/2}, \quad (32)$$

где γ – поверхностная энергия ступеньки ($\gamma \approx \mu \cdot b / 10$).

Из (32) для l^* получаем $l^* \approx 8\mu^2 b / [10\sigma_0^2 \pi(1-\nu)]$.

На рис. 4 представлена зависимость длины МТ от времени развития Ф-К в поверхностном слое контактирующих пластин. Как видно из рис. 4, приведенные кривые свидетельствуют о смене механизма образования МТ (кривые имеют характерный «излом»). Действительно, на первом этапе развития Ф-К, когда роль локальной температуры в контакте велика, происходит диффузионное расплывание зон Коттрелла.

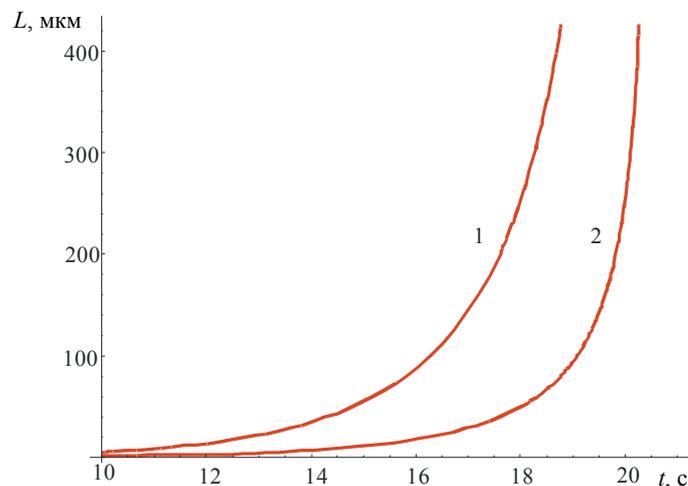


Рис. 4. Зависимость длины МТ L от времени развития Ф-К для разных значений величины σ_0 / μ : 1 – $125 \cdot 10^{-4}$; 2 – $625 \cdot 10^{-4}$

В результате эффективная длина дислокационных сегментов увеличивается за счет уменьшения точек закрепления. Из-за появления зон абразивного действия возможно полное открепление дислокационных петель, что может привести к совместному дрейфу дислокации и ее примесной атмосферы в поле знакопеременного нормального напряжения. Скорость дрейфа дислокации ограничивается скоростью миграции примесной атмосферы, которая стимулируется вакансиями, образованными при движении дислокационных сегментов.

Второй этап характеризуется образованием дислокационного скопления вблизи препятствия. В области такого скопления может возникнуть клиновидная полость, которая является источником зарождения МТ. Пологие участки кривых на рис. 4 (до момента «излома») описывают процесс «подрастания» клиновидной полости за счет динамики дислокационного скопления. На третьем этапе механизм «подрастания» клиновидной полости до момента ее раскрытия сменяется механизмом развития МТ, связанным с появлением на поверхности контактирующих пластин больших каверн, заполненных абразивом, и соответствующим увеличением нормального напряжения (ср. кривые 1 и 2 на рис. 4).

Заключение

В работе развит теоретический подход к описанию процесса Ф-К применительно к пакету листовой рессоры. Подход основан на рассмотрении дислокационной ползучести, инициированной температурой контакта и нормальным напряжением в зоне абразивного действия.

Для определения локальной температуры в контакте была решена первая краевая задача для одномерного уравнения теплопроводности в пластине с периодически изменяющейся температурой поверхности. Показано, что локальная температура в контакте является периодической функцией времени вследствие возвратно-поступательного движения пластины, при котором разрушаются окисные пленки и микровыступы на ее контактирующих поверхностях. Найдено, что увеличение частоты горизонтальных перемещений ускоряет изнашивание поверхности, однако, когда соответствующий период колебаний становится меньше времени окислительных процессов, рост скорости изнашивания может прекратиться.

Для расчета поперечных колебаний одной из пары контактирующих пластин была использована модель равномерно распределенной поперечной силы. Получено решение неоднородного уравнения поперечных колебаний пластины с однородными граничными условиями. Показано, что вблизи резонанса амплитуда поперечного смещения увеличивается более чем на порядок. Это может привести к существенному росту нормального напряжения и, как следствие, к росту скорости изнашивания при Ф-К за счет увеличения площади контакта, пораженной коррозией. В рамках механизма дислокационной ползучести с атмосферами Коттрелла проведен расчет длины МТ L и исследована ее зависимость от времени t развития Ф-К. Показано, что кривые $L(t)$ содержат характерный излом, связанный со сменой механизма образования МТ. Установлено, что пологие участки кривых $L(t)$ описывают процесс «подрастания» клиновидной полости до момента ее раскрытия. Далее происходит смена данного механизма на механизм развития МТ, связанный с появлением на контактирующей поверхности больших каверн, заполненных абразивом. Полученные результаты могут оказаться полезными с точки зрения корректировки существующих методов борьбы с Ф-К с позиций дефектной структуры материала. Следует отметить, что зарождение и развитие МТ в процессе Ф-К стимулирует теоретические и экспериментальные исследования акустической эмиссии, которая несет ценную информацию о динамике дефектной структуры материала.

Список литературы

1. **Артемов, И. И.** Дислокационная модель фреттинг-усталости в условиях вибрационного нагружения металла / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – № 5. – С. 42–45.
2. **Артемов, И. И.** Акустическая эмиссия в условиях «скрытого» подрастания микротрещин / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 4. – С. 92–95.
3. **Сафонов, А. Л.** Фреттинг-коррозия в электрических контактах / А. Л. Сафонов, Л. И. Сафонов // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 3. – С. 48–54.
4. **Гаманюк, Д.** Фреттинг-коррозия и ее влияние на жизненный цикл электрических соединителей / Д. Гаманюк // Технологии в электронной промышленности. – 2009. – № 4. – С. 37–39.
5. **Криштал, М. А.** Ползучесть и разрушение сплавов / М. А. Криштал, И. Л. Миркин. – М. : Металлургия, 1966. – 169 с.
6. **Карслоу, Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.

7. **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника. Износ и безыносность / Д. Н. Гаркунов. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.
 8. **Хирт, Дж.** Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 600 с.
 9. **Градштейн, И. С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Наука, 1971. – 1108 с.
-

Артемов Игорь Иосифович

доктор технических наук, профессор,
проректор по науке, Пензенский
государственный университет

E-mail: rectorat@pnzgu.ru

Artyomov Igor Iosifovich

Doctor of engineering sciences, professor,
vice rector for research, Penza State
University

Кревчик Владимир Дмитриевич

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики, Пензенский государственный
университет

E-mail: physics@pnzgu.ru

Krevchik Vladimir Dmitrievich

Doctor of physical and mathematical
sciences, head of sub-department
of physics, Penza State University

Меньшова Светлана Борисовна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра естественнонаучных
и технических дисциплин,
Кузнецкий институт информационных
и управленческих технологий
(филиал Пензенского государственного
университета)

E-mail: pnz-transmash@yandex.ru

Menshova Svetlana Borisovna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of natural-science
and engineering disciplines, Kuznetsk
Institute of Information and Administrative
Technologies (affiliated branch of Penza
State University)

Келасьев Василий Владимирович

ассистент, кафедра транспортных
машин, Пензенский государственный
университет

E-mail: pnz-transmash@yandex.ru

Kelasyev Vasily Vladimirovich

Assistant, sub-department of transport
machinery, Penza State University

Маринина Лариса Александровна

кандидат технических наук, доцент,
Сердобский филиал Пензенского
государственного университета

E-mail: sfpgu@sura.ru

Marinina Larisa Alexandrovna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, Affiliated branch of Penza State
University in Serdobsk

УДК 658.56

Артемов, И. И.

Модель развития фреттинг-коррозии в поверхностном слое листа рессоры / И. И. Артемов, В. Д. Кревчик, С. Б. Меньшова, В. В. Келасьев, Л. А. Маринина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 213–224.

Внимание авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru, дискета 3,5", CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья **обязательно** должна сопровождаться индексом УДК, краткой аннотацией и ключевыми словами **на русском и английском языках**.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисовочными подписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версия 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. В списке указывается:

- для книг – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц;
- для журнальных статей, сборников трудов – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, выпуск, страницы;
- для материалов конференций – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, время и место проведения конференции, город, издательство, год, страницы.

В конце статьи допускается указание наименования программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

К материалам статьи **должна** прилагаться информация для заполнения учетного листа автора: фамилия, имя, отчество, место работы и должность, ученая степень, ученое звание, адрес, контактные телефоны (желательно сотовые), e-mail.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Рукопись, полученная редакцией, не возвращается.

Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- **информатика**
- **вычислительная техника**
- **управление**
- **электроника**
- **измерительная техника**
- **радиотехника**
- **машиностроение**
- **машиноведение**

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс (841-2) 36-84-87, тел.: 36-84-87, 56-47-33; E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку на второе полугодие 2011 г. можно также оформить по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ» «Газеты. Журналы», тематический раздел «Известия высших учебных заведений». Подписной индекс – 36966

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 2011 г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата «___» _____ 2011 г.