

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3 (19)

2011

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Вашкевич Н. П., Бикташев Р. А., Меркурьев А. И.</i> Аппаратная поддержка диспетчера задач с глобальной очередью в многопроцессорных системах	3
<i>Годунов А. И., Кемалов Б. К., Юрков Н. К.</i> Обеспечение комплексной адекватности авиационных тренажеров	15
<i>Белов В. Н., Макарычев П. П.</i> Анализ базы данных с применением алгебры кортежей	25
<i>Кольчугина Е. А.</i> Сосуществование групп в составе сообщества программных агентов	37
<i>Дубинин В. Н., Вяткин В. В.</i> Верификация приложений IEC 61499 на основе метода Model Checking	44
<i>Пащенко Д. В., Трокоз Д. А.</i> Разработка многопоточной модели программного обеспечения экспертной системы авиационных радиолокационных комплексов	56
<i>Федотов Н. Г., Петренко А. Г., Рой А. В., Фионов Н. С.</i> Поиск изображения человеческого лица по фотороботу в большой базе данных	65
<i>Потапов И. В., Романенко В. А.</i> Синтез оптимального управления трансферными авиаперевозками методами математического программирования	75
<i>Суровицкая Г. В., Шитов Д. В., Комиссарова Т. Б.</i> Программно-сервисные средства управления документацией системы менеджмента качества университета	87

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

<i>Ашанин В. Н.</i> Классификация измерительных преобразователей информации непрерывно-дискретной системы гетерогенной структуры	98
<i>Чайковский В. С., Светлов А. В.</i> Методика определения плотности вероятности размаха шума операционных усилителей	105

<i>Шаронов Г. И., Шаманов Р. С.</i> Способы измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника многополюсной электрической цепи типа «треугольник»	115
<i>Тутушкин В. И., Фандеев В. П.</i> Методический подход к выбору диагностического параметра для прогнозирования технического состояния электронных приборов и аппаратуры.....	124
<i>Лунев И. В., Сараев Д. В., Каргин Р. В., Гончаров А. В.</i> Экспериментальная установка для флуктуационных диэлектрических измерений	133

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Волчихин В. И., Литвинов А. Н.</i> Моделирование динамических процессов контактных систем приборов.....	140
<i>Волчихин В. И., Артамонов Д. В., Чиркина М. А.</i> Теоретическое исследование методом автономных блоков волновых процессов в гетерогенных структурах при динамических нагружениях.....	153
<i>Тарасенко Ю. П., Бердник О. Б., Царева И. Н.</i> Структурно-фазовое состояние и механические свойства материала лопатки турбины высокого давления после разрушения	160
<i>Зверовщиков В. З., Соколов А. В.</i> Повышение качественных характеристик поверхности при профильном алмазном шлифовании	167
<i>Артемов И. И., Кочкин С. В., Кожевников В. В.</i> Снижение неуравновешенности стальных колес путем применения пространственно-ориентированной сборки	175

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3.012

Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, А. И. Меркурьев

АППАРАТНАЯ ПОДДЕРЖКА ДИСПЕТЧЕРА ЗАДАЧ С ГЛОБАЛЬНОЙ ОЧЕРЕДЬЮ В МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Представлены результаты исследований по аппаратно-программной реализации функции диспетчеризации многопроцессорных операционных систем с глобальной очередью задач, а также формальное описание алгоритмов синхронизации взаимодействующих процессов при диспетчеризации задач на основе аппарата недетерминированных автоматов. Проведено моделирование алгоритмов на языке VHDL и проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: недетерминированные автоматы, алгоритмы диспетчеризации задач, аппаратная реализация алгоритмов, многопроцессорные системы.

Abstract. The article presents the results of research on hardware and software implementation of scheduling functions for multiprocessor operating systems with the global task queue. The authors give a formal description of algorithms for synchronization of cooperating processes in the scheduling of tasks on the basis of the apparatus of nondeterministic automata. The article also gives an account of the simulation of algorithms in VHDL and the analysis of research results.

Key words: nondeterministic automata, algorithms for task scheduling, hardware implementation of algorithms, multiprocessor systems.

Введение

Одной из наиболее часто используемых функций операционных систем является функция назначения задач, реализуемая диспетчером. В многопроцессорных системах частота использования диспетчера увеличивается многократно. Диспетчер задач в многопроцессорной системе становится общим ресурсом для множества процессов. Функционирование диспетчера усложняется в связи с необходимостью обслуживания им запросов от одного или более освободившихся процессоров на выделение нового процесса из очереди готовых задач, что требует соответствующих средств синхронизации, обеспечивающих бесконфликтный доступ к единственной очереди готовых задач. При проектировании многопроцессорных операционных систем следует учитывать накладные расходы, возникающие в этой связи, поскольку функция синхронизации параллельных процессов представляет собой последовательный участок программы и, в соответствии с законом Амдала, является фактором, снижающим производительность многопроцессорной системы.

Традиционно процедура диспетчеризации и связанная с ней синхронизация процессов осуществляются программным способом в пространстве ядра с применением механизма монитора [1]. Такой способ хорошо отработан, но требует значительных временных затрат на выполнение системных вызовов, связанных с вхождением процесса в монитор, и реализацию очереди блокированных процессов, возникающую из-за конкуренции множества процессоров при доступе к диспетчеру. Этот фактор существенно увеличивает время ожидания процессов и, следовательно, снижает общую производительность многопроцессорной системы. Известно, что на диспетчеризацию процессов уходит до десятка тысяч процессорных тактов, что соответствует временным потерям в несколько микросекунд на самых высоких частотах работы процессоров.

Одним из путей решения проблемы является аппаратная реализация функций диспетчеризации, которая в значительной степени снимает проблему временных потерь. Кроме того, этим достигается увеличение надежности операционной системы, что особенно важно для проблемно ориентированных и специализированных систем. Предлагаемый подход заключается в том, что аппаратная поддержка диспетчера задач выполняется в виде независимого устройства в составе многопроцессорной системы.

Аппаратная реализация требует поиска методов формализации алгоритмов функционирования, способных упростить и облегчить процесс проектирования соответствующих устройств. В работе использован аппарат недетерминированных автоматов (НДА) [2] для формализации алгоритмов управления диспетчеризацией задач в многопроцессорной системе и связанных с ней синхронизацией параллельных процессов.

1. Формализация алгоритма синхронизации процессов при диспетчеризации задач в многопроцессорных системах

В самом общем виде алгоритм синхронизации процессов при диспетчеризации задач выглядит следующим образом. В начальном состоянии каждый включающийся в работу процессор выполняет операцию «готов» и переходит в спящий режим, в котором находится до тех пор, пока на обслуживание не поступит задача. Если все процессоры заняты обслуживанием, то вновь поступившая задача помещается в конец очереди, число мест в которой ограничено. Если вновь поступившая задача обнаружит, что очередь заполнена, она на обслуживание не принимается и покидает систему. Принятая на обслуживание задача находится в очереди до тех пор, пока не поступит на выполнение в процессор, при этом в очереди освобождается одно место. После выполнения очередной задачи процессор просматривает очередь, и если в ней имеются ожидающие задачи, то он берет на выполнение задачу, стоящую в голове списка. Если очередь пуста, процессор переходит в режим ожидания. Если освободилось одновременно несколько процессоров, то производится выбор одного из них для обслуживания очередной задачи.

В общем случае алгоритм диспетчеризации в явном виде связан с взаимодействием процессов. С одной стороны – задачи (процессы, потоки), требующие своего выполнения, с другой стороны – обслуживающие их процессорные узлы. Эти действия необходимо синхронизировать таким образом, чтобы обеспечить так называемое «рандеву» [3], когда j -й процессорный узел должен дождаться поступления задачи, а i -я задача – освобождения одного из

процессоров, после чего она будет обслуживаться в течение некоторого времени.

Следует учесть обстоятельство, что при одновременном освобождении нескольких процессоров они могут одновременно обратиться к общей очереди задач, вызывая тем самым конфликт, который разрешается методом взаимных исключений с использованием приоритетов задач.

Традиционный подход, связанный с таким обслуживанием, аналогичен задаче «спящего парикмахера» [1, 3], который широко применялся для вычислительных систем с одним процессором. Для многопроцессорных систем такой подход должен быть расширен до задачи, которую можно назвать «работа парикмахерской». Эта задача иллюстрирует отношения «клиент–сервер», которые имеют место между процессами в многопроцессорных вычислительных системах. Причем аналогом процессоров является коллектив парикмахеров, а аналогом задач выступают клиенты парикмахерской [4].

Формальное описание алгоритма взаимодействия процессов в данной задаче базируется на использовании моделей недетерминированных автоматов [2]. Модели представляются в виде систем канонических уравнений, описывающих все реализуемые события управляющего алгоритма [4]. Весь алгоритм работы диспетчера содержит три части: клиентскую (постановка задачи в очередь), серверную (обслуживание процессорами) и «рандеву» (наличие задачи и готовность одного из процессоров к обслуживанию этой задачи). Для описания алгоритма введены основные частные события, представленные в табл. 1. В последней колонке представлено их соответствие сигналам на схеме устройства синхронизации процессов диспетчера задач.

Таблица 1

Обозначение события	Описание частного события	Сигналы на схемах
1	2	3
S_I^t	Поступление задачи извне	$S_task_arrived$
S_{FQ}^t	В очереди имеются свободные места	$\overline{S_fifo_full}$
S_Q^t	Задача в очереди	$S_task_in_queue$
S_{ZPj}^t	Запрос j -го процессора диспетчером	$S_proc_zapr_j$
S_{GPj}^t	Задача готова к обслуживанию в j -м процессоре, j -й процессор помещается в пул занятых	$S_task_ready_j$
S_{PZ}^{pj}	j -й процессор выдал сигнал подтверждения запроса	$S_proc_pzapr_j$
S_S^{pj}	j -й процессор помещается в пул свободных	$S_proc_free_j$
S_S^p	В процессорном пуле имеются свободные процессоры	S_proc_free
S_{PT}^{pj}	j -й процессор задачу принял	$S_proc_prinyal_j$
S_{SL}^{pj}	j -й процессор выбран для обслуживания задачи	$S_proc_sel_j$
S_A^{pj}	j -й процессор выполняет обслуживание задачи	Аппаратно не реализовано

1	2	3
S_{OF}^t	Удалить задачу из очереди	-----\\-----
S_{TO}^{pj}	Снять задачу с исполнения	-----\\-----
S_E^{pj}	Выполнение задачи закончено	-----\\-----
S_{RT}^t	Выдача результата выполнения текущей задачи	-----\\-----

На основании словесно представленного алгоритма управления процессами и введенных событий, реализуемых в этом алгоритме, система канонических уравнений, описывающих эти события, будет иметь следующий вид:

– для процесса «клиент», реализуемого диспетчером до момента рандеву:

$$\begin{aligned}
 S_Q^t(t+1) &= S_I^t S_{FQ}^t \vee S_Q^t \overline{S_{SL}^{pj}}; \\
 S_{ZPj}^t(t+1) &= S_Q^t S_{SL}^{pj} \vee S_{ZPj}^t \overline{S_{PZ}^{pj}}; \\
 S_{GPj}^t(t+1) &= S_{ZPj}^t S_{PZ}^{pj} \vee S_{GPj}^t \overline{S_{PT}^{pj}};
 \end{aligned} \tag{1}$$

– для процесса «сервер», реализуемого процессором до момента рандеву:

$$\begin{aligned}
 S_{PZ}^{pj}(t+1) &= S_{SL}^{pj} S_Q^t S_{ZPj}^t \vee S_{PZ}^{pj} \overline{S_{GPj}^t}; \\
 S_{PT}^{pj}(t+1) &= S_{PZ}^{pj} S_{GPj}^t.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Система канонических уравнений, описывающая события после рандеву:

$$\begin{aligned}
 S_A^{pj}(t+1) &= S_{PT}^{pj} S_{GPj}^t \vee S_A^{pj} \overline{S_E^{pj}}; S_{TO}^{pj}(t+1) = S_A^{pj} S_E^{pj} \vee S_{TO}^{pj} \overline{S_{RT}^t}; \\
 S_{RT}^t(t+1) &= S_A^{pj} S_E^{pj} \vee S_{RT}^t \overline{S_{TO}^{pj}}; S_{OF}^t(t+1) = S_{TO}^{pj} S_{RT}^t; \\
 S_S^{pj}(t+1) &= S_{TO}^{pj} S_{RT}^t \vee S_S^{pj} \overline{S_{VP}^{pj}}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Уравнениям соответствует граф недетерминированного автомата (рис. 1), содержащий клиентскую и серверную части алгоритма управления взаимодействующими процессами до момента «рандеву» (до оператора объединения $J(\&)$) и после «рандеву», а также выбор j -го процессора для обслуживания очередной задачи.

Выбор j -го процессора для обслуживания очередной задачи (событие S_{SL}^{pj}) связан с синхронизацией параллельных процессов, определяющих этот выбор, с учетом их взаимоисключения и приоритетов, и осуществляется на основе использования монитороподобного механизма [1].

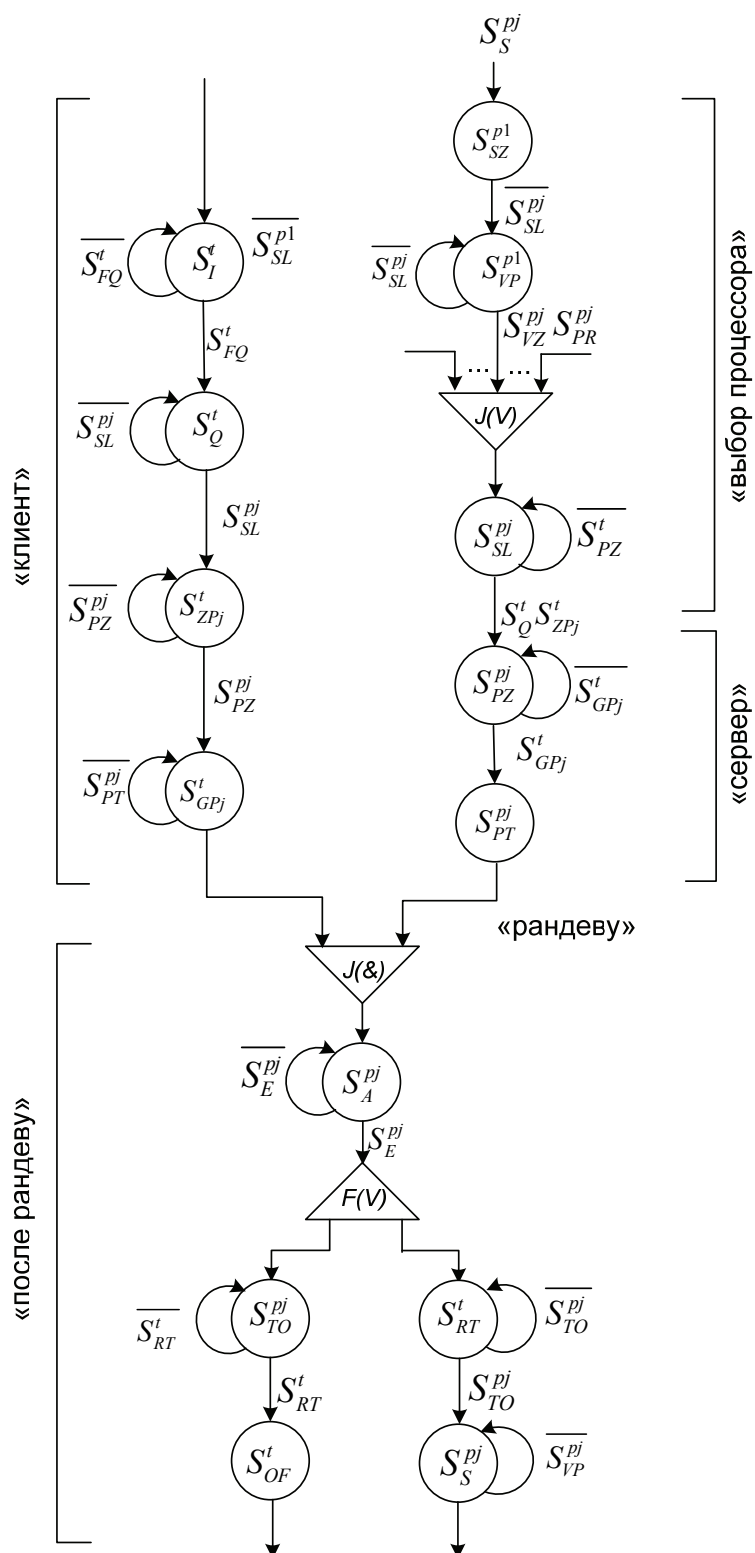


Рис. 1. Граф НДА-алгоритма управления взаимодействующими процессами при диспетчеризации задач в многопроцессорной системе

Система уравнений для событий, определяющих входы j -го процессора в монитор, и его выбора имеет вид

$$S_{SL}^{pj}(t+1) = S_{VP}^{pj} S_{VZ}^{pj} S_{PR}^{pj} \vee S_{SL}^{pj} \overline{S_{PZ}^{pj}} \quad j=1, \overline{N}, \quad (4)$$

где S_{SZ}^{pj} – событие, определяющее наличие заявки от свободного j -го процессора на обслуживание очередной задачи; S_{VP}^{pj} – событие, определяющее прием заявки для обращения к разделяемым данным (прием заявки от свободного j -го процессора на обслуживание очередной задачи):

$$S_{VP}^{pj}(t+1) = (S_{SZ}^{pj} \vee S_{VP}^{pj}) \overline{S_{SL}^{pj}}; \quad (5)$$

S_{VZ}^{pj} – комбинационное событие, обеспечивающее взаимоисключение при осуществлении процедуры выбора свободных процессоров для обслуживания очередной задачи на основе несовместимости события S_{SL}^{pj} с другими событиями из их общего числа, равного N , определяется выражением

$$S_{VZ}^{pj} = \overline{S_{SL}^{p_1}} \overline{S_{SL}^{p_2}} \dots \overline{S_{SL}^{p_{j-1}}} \overline{S_{SL}^{p_{j+1}}} \dots \overline{S_{SL}^{p_N}}; \quad (6)$$

S_{PR}^{pj} – событие, обеспечивающее приоритет выбора j -го процессора на обслуживание очередной задачи. Алгоритм вычисления приоритетного события для циклической дисциплины обслуживания дан в работе [5].

2. Моделирование алгоритма на языке VHDL

Аппаратная поддержка алгоритма диспетчеризации задач реализована в части синхронизации взаимодействующих процессов. Другие функции, такие как сохранение и восстановление контекста, перемещение процессов из очереди готовых задач в очередь ожидающих и т.п., реализуются традиционным путем и в данной модели не рассматриваются.

Устройство аппаратной поддержки рассмотрено на примере многопроцессорной системы, состоящей из восьми процессоров, объединенных общей шиной. Возможны два варианта подключения диспетчера к процессорному узлу. В первом варианте для передачи сигналов между процессором и диспетчером используется общая шина, что создает нежелательный дополнительный трафик на ней. Во втором варианте устройство диспетчеризации имеет собственный интерфейс взаимодействия с каждым процессором, т.е. в каждом процессорном узле реализован интерфейс для запроса и приема идентификаторов задач от диспетчера. Реализован второй подход, хотя он несколько усложняет процессорный блок, поскольку требует дополнительных выводов для вновь введенных сигналов. Общий вид системы представлен на рис. 2.

Клиентский процесс развивается следующим образом. Если имеется некоторая задача, ожидающая обслуживания, то диспетчер при условии, что имеются свободные процессоры, устанавливает активный уровень сигнала «Запрос» (S_{proc_zapr}) на линии того процессора, который выбирается из числа свободных по заданному алгоритму. Процессор, получивший сигнал

диспетчера о его выборе для обслуживания текущей задачи, выходит из спящего режима и сообщает диспетчеру о том, что готов к приему и выполнению задачи. Для этого процессор устанавливает активный уровень сигнала «Подтверждение запроса» (S_proc_pzapr), который воспринимает диспетчер. Кроме того, процессор снимает сигнал «Свободен» (S_proc_free), тем самым выходит из пула свободных. Процессор назначен, и далее диспетчер переходит к непосредственной передаче идентификатора задачи процессору. Для этого он извлекает идентификатор задачи из внутреннего регистра, выставляет его на шину (V_task_id) и передает в процессор сигнал «Задача готова» (S_task_ready). Этот сигнал гарантирует достоверность присутствия на шине идентификатора текущей задачи (V_task_id). Процессор фиксирует идентификатор на своем внутреннем регистре, после чего выставляет сигнал «Задача принята» ($S_proc_prinyal$).

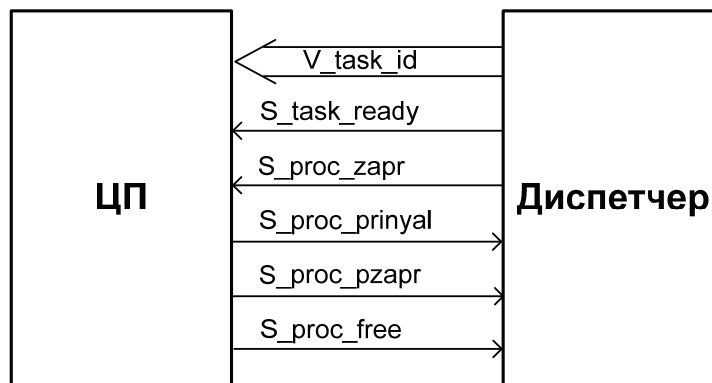


Рис. 2. Интерфейс взаимодействия одного процессора с диспетчером

Серверный процесс развивается так. Процессор, не занятый обслуживанием задачи (свободный), находится в спящем режиме. Сигнал «Свободен» (S_proc_free), поступающий от процессора к диспетчеру, принимает в этом случае активный уровень. Если в очереди имеются готовые задачи, выбирается обслуживающий процессор по приоритетному алгоритму, причем первый приоритет в данном случае присвоен процессору с номером 1. Выбранный процессор выходит из спящего режима, выбирает задачу из начала очереди (S_fifo_read), получает идентификатор задачи по шине (V_task_id), выставляет сигнал «Задача принята» ($S_proc_prinyal$) и переходит в режим «Занято».

После этого диспетчер может снять данные с шины и перейти к назначению следующей задачи. Процессор, получивший идентификатор задачи, переходит к ее обслуживанию. Все сигналы интерфейса снимаются (на всех линиях устанавливается пассивный уровень). По завершении работы процессор извещает диспетчера о том, что свободен, путем установления активного уровня сигнала «Свободен» (S_proc_free), перемещается в пул свободных процессоров, поэтому диспетчер вновь будет учитывать его при распределении задач.

Аппаратно устройство синхронизации процессов при диспетчеризации задач представлено в виде четырех блоков: блок управления очередью задач, блок очереди задач *FIFO*, блок выбора процессора для обслуживания очередной задачи и блок управления ресурсами (рис. 3).

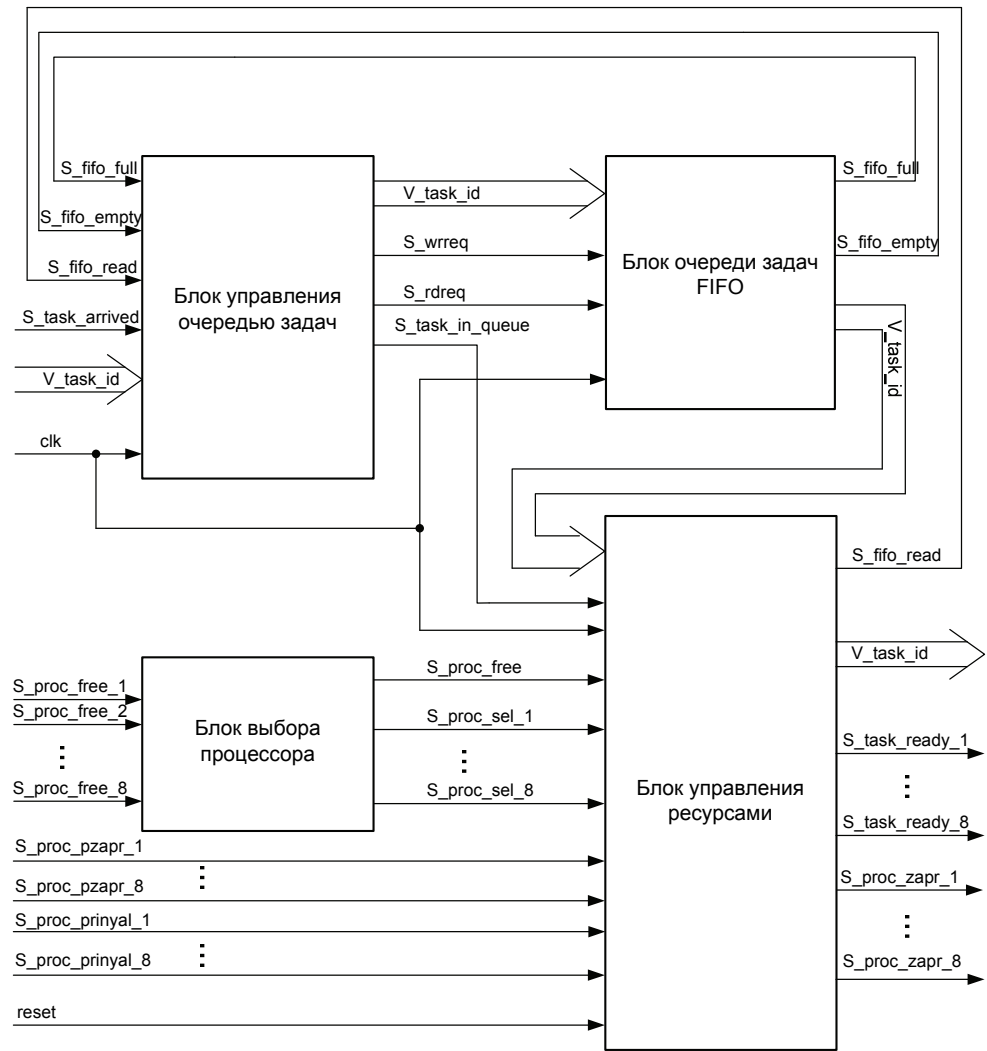


Рис. 3. Устройство синхронизации процессов при диспетчеризации задач

Блок управления очередью задач выполняет часть функций планировщика, т.е. формирует очередь задач и отслеживает ее состояние, используя для этого два сигнала. Активный уровень сигнала «FIFO заполнено» (*S_fifo_full*) сообщает планировщику о том, что принимать новые задачи запрещено, так как нет свободных регистров для записи и хранения новых идентификаторов. Так же обстоит дело и с поступающими задачами. Если в очереди нет места для записи новых идентификаторов задач, то они планировщиком не воспринимаются. Второй сигнал – «FIFO пустое» (*S_fifo_empty*) – указывает на то, что ни один идентификатор в очередь не поставлен, т.е. очередь задач пуста. О наличии задачи в очереди свидетельствует сигнал *S_task_in_queue*. На его основе принимается решение о том, выводить из спящего режима процессор или нет. Если очередь задач пуста, то блок синхронизации не обращается к процессорам. Сигналы «FIFO заполнено» (*S_fifo_full*) и «FIFO пустое» (*S_fifo_empty*) формируются и поступают в блок управления очередью задач из блока *FIFO*.

Идентификаторы задач передаются в блок управления очередью задач по входной шине данных (*V_task_id*). О том что на шине присутствует новая задача, планировщика извещает нарастающий фронт сигнала «Поступила задача» (*S_task_arrived*). Если очередь не заполнена, то планировщик принимает данные с шины *V_task_id* и записывает их в конец очереди *FIFO*. Если очередь *FIFO* заполнена, данные на входной шине игнорируются. Запрос очередной задачи выполняет один из процессоров, выбранный в качестве обслуживающего. Для этого используется сигнал «Запрос задачи» (*S_fifo_read_j*). На основании этого сигнала блок диспетчеризации формирует сигнал «Чтение *FIFO*» (*S_fifo_read*) и передает его блоку управления очередью задач.

Планировщик управляет блоком очереди задач *FIFO*, пользуясь сигналами *S_wrreq* и *S_rdreq*. *S_wrreq* используется для записи в очередь *FIFO*, а *S_rdreq* – для чтения из нее. Блок очереди задач *FIFO* хранит поступающие идентификаторы задач. Идентификатор является частью контекста задачи и может состоять из нескольких полей, одно из которых указывает на адрес задачи в памяти.

Блок выбора процессора принимает все сигналы «Свободен» (*S_proc_free*) от всех процессоров в системе. Он определяет, присутствуют ли в данный момент в системе свободные процессоры, и, если в системе есть хотя бы один процессор, не занятый обслуживанием задачи, то этот блок устанавливает активный уровень сигнала «Есть свободные процессоры» (*S_proc_free*) и таким образом извещает блок синхронизации о том, что имеются «спящие» процессоры.

Выбор процессоров осуществляется схемой взаимного исключения, реализующей логическое выражение (6) и схемой приоритетов, реализация которой показана в [5]. Для сообщения блоку диспетчеризации о том, какой из процессоров выбран для обслуживания, служат сигналы (*S_proc_sel_1*, ..., *S_proc_sel_8*).

Блок управления ресурсами осуществляет взаимодействие очереди задач с процессорами по описанному ранее интерфейсу. Блок выбора процессора формирует информацию о том, какой из свободных процессоров выбран (на основании схемы приоритетов и взаимного исключения) для обслуживания текущей задачи. Идентификатор принятой на обслуживание задачи передается блоком очереди задач *FIFO* по шине *V_task_id*. Кроме того, блок управления очередью задач сообщает о состоянии очереди и осуществляет выборку идентификатора задач из блока очереди *FIFO* по требованию блока управления ресурсами. Все другие функции диспетчера и планировщика реализуются на уровне ядра операционной системы.

Модель устройства диспетчера была реализована на языке VHDL в виде четырех программных модулей. Ввод схем и работа производилась в свободно распространяемой версии системы Quartus II Version 5.1 Service Pack 1, моделирование производилось в той же системе. Для проведения моделирования использовались два дополнительных блока.

Первый блок – генерации задач, имитирует поток задач на входе вычислительной системы. Этот блок через равные промежутки времени выставляет новый идентификатор задачи и самостоятельно извещает об этом блок управления очередью. Чтобы запустить работу блока генерации задач, достаточно подать активный уровень на вход блока *start*. Второй блок – имитации

работы процессора, выставляет все сигналы интерфейса «процессор–диспетчер», имитируя ответы процессора. Когда идентификатор задачи получен блоком имитации, запускается счетчик, который отсчитывает заданное число тактов работы процессора. На это время блок имитации процессора отключается от диспетчера точно так же, как если бы реальный процессор, получив задачу, перешел бы к ее обслуживанию. Таким образом, процессор затрачивает на обработку задачи время, отсчитываемое счетчиком. После выполнения счетчиком заданного количества тактов блок имитации процессора сообщает диспетчеру о том, что он свободен.

Общий вид структурной схемы моделирования представлен на рис. 4.

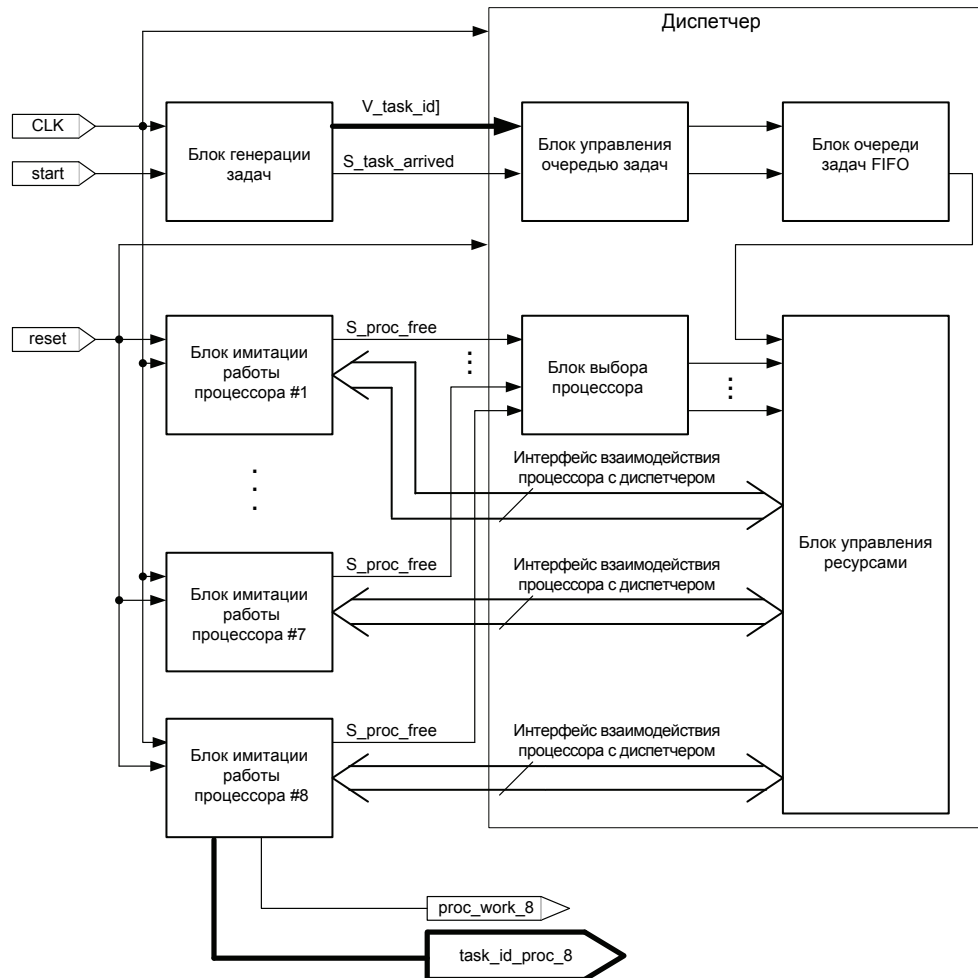


Рис. 4. Схема постановки эксперимента

Из рис. 4 видно, что практически все описанные ранее сигналы для данной системы являются внутренними и генерируются самостоятельно. Тактирование всех блоков производится синхросигналами CLK. Перед началом работы имитатора необходимо произвести начальный сброс системы (reset) и запустить генератор задач (start). Для проверки результатов моделирования использовались выходы *proc_work[j]* и *task_id_proc[j]*. Первый вывод

(*proc_work[j]*) информирует о том, что *j*-й процессор получил идентификатор текущей задачи и приступил к ее обслуживанию. Шина *task_id_proc[j]* передает номер идентификатора, который получил *j*-й процессор. Также при моделировании фиксировалась шина данных блока очереди *FIFO* для контроля поступающих в систему идентификаторов задач (*task_id_in_fifo*). Результаты моделирования представлены на рис. 5.

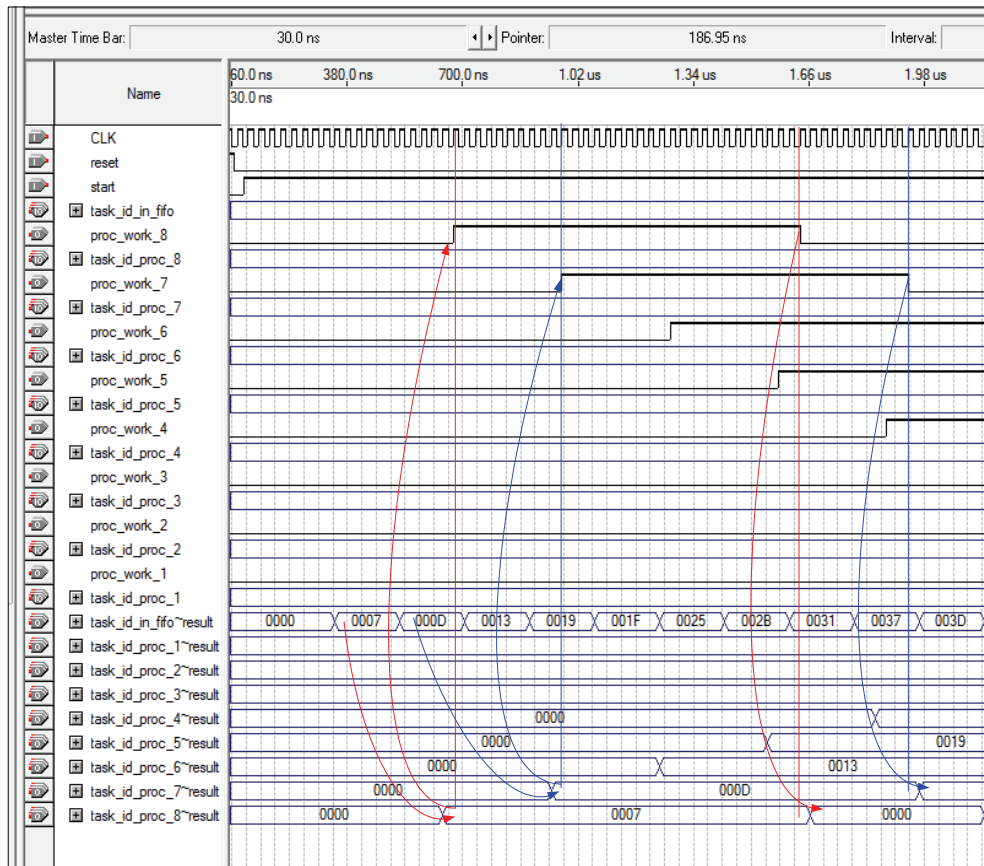


Рис. 5. Временная диаграмма работы системы с восемью процессорами

Временная диаграмма показывает, что идентификатор первой поступившей задачи с номером «0007» ровно через 10 тактов поступил в процессор 8, после чего процессор выставил сигнал о начале ее обслуживания. Второй идентификатор задачи под номером «000D» поступил через 10 тактов в процессор 7. Этот процессор, аналогично предыдущему, выставил сигнал о том, что занят, и приступил к обслуживанию второй задачи. Очевидно, что те 10 тактов, которые предшествуют назначению задачи процессору, уходят на работу самого диспетчера.

Заключение

Модель была протестирована в различных режимах работы и показала хорошие результаты. Так, на работу устройства синхронизации диспетчера уходит всего 10 процессорных тактов, что значительно меньше, чем при его

программной реализации, в которой только вызов функции монитора занимает сотни тактов.

Список литературы

1. **Таненбаум, Э.** Современные операционные системы / Э. Таненбаум. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2002. – 1040 с.
2. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки : учебное пособие / Н. П. Вашкевич. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 280 с.
3. **Эндрюс, Г. Р.** Основы многопоточного параллельного и распределенного программирования : пер. с англ. / Г. Р. Эндрюс. – М. : Вильямс, 2003. – 512 с.
4. **Вашкевич, Н. П.** Формализация алгоритма синхронизации процессов при диспетчеризации задач в многопроцессорных системах с использованием механизма рандеву / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев // Информационные технологии. – 2009. – № 12. – С. 12–17.
5. **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

Biktaşev Ravil Aynulovich

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

Меркурьев Андрей Игоревич

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: bra559620@sura.ru

Merkuryev Andrey Igorevich

Postgraduate student,
Penza State University

УДК 681.3.012

Вашкевич, Н. П.

Аппаратная поддержка диспетчера задач с глобальной очередью в многопроцессорных системах / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, А. И. Меркурьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 3–14.

А. И. Годунов, Б. К. Кемалов, Н. К. Юрков

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ АДЕКВАТНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ¹

Аннотация. Рассмотрены степени сходства математических моделей и реального авиационного тренажера, предложена методика оценки адекватности моделей; проводится оценка адекватности на агрегатном и системном, а также на комплексном уровнях применительно ко всей системе в целом.

Ключевые слова: авиационные тренажеры, математические модели, летательные аппараты, информационная адекватность, человек-оператор.

Abstract. The Article considers the degrees of similarity of mathematical models and a real aviation simulator. The authors suggest a technique of model's adequacy estimation; conduct the adequacy estimation on modular, system, and complex levels with regard to the whole system integrally.

Key words: aviation simulators, mathematical models, aircrafts, information adequacy, human-operator.

Введение

Повышение роли летчика в современной авиации требует совершенствования методических и технических средств профессионального отбора и подготовки летного состава. Одним из наиболее эффективных средств формирования и развития знаний и профессиональных навыков, необходимых летчику в реальных условиях деятельности, являются тренажеры.

В современном авиационном тренажере (АТ) предполагается предоставление обучаемому специализированного комплекса технических средств, обеспечивающих искусственное воспроизведение условий и факторов, аналогичных тем, которые имеют место в летной практике.

Таким образом, в современном авиационном тренажере имитация условий работы летчика осуществляется на основе использования копии рабочего места, интерьер которого максимально приближен к интерьеру реального самолета. Динамика и логика функционирования его подсистем моделируется вычислительным устройством. Это позволяет имитировать в требуемом объеме весь процесс деятельности человека-оператора и, следовательно, производить выработку у человека необходимых навыков по управлению как летательным аппаратом (ЛА) в целом, так и его отдельными подсистемами.

Итак, в авиационном тренажере реализуются (имитируются) интерьерные и математические модели технической и физической сущности эргатической системы «самолет – среда – летчик», а также все необходимые взаимосвязи в этой сложной системе.

1. Адекватность математических и имитационных моделей

Существует ряд терминов, описывающих различные степени сходства между оригиналом и его моделью: тождество, эквивалентность, изоморфизм, гомоморфизм, подобие и адекватность.

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств неразрушающего диагностирования бортовых радиотехнических устройств космических систем» (ГК № 14.740.11.0840) ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013 гг.)».

Будем рассматривать только первую и последнюю степени сходства, имеющие, по нашему мнению, самое непосредственное отношение к авиационным тренажерам.

Тождество предполагает полное или практически полное совпадение всех характеристик. Оно относится к объектам не только одной и той же физической природы, но и к объектам, повторяющим друг друга в деталях. Допуски в данном случае являются минимальными, а в некоторых случаях по ряду важных характеристик допуски близки к нулю. Это относится только к натурным элементам, например к интерьеру кабины.

Применительно к остальным задачам и методам математического и имитационного моделирования для тренажеров наиболее подходящим понятием является адекватность моделей.

Понятие адекватности может быть с успехом применено и к определению соответствия между размытым множеством реальных характеристик, имеющим стохастическую природу, и имитирующей его областью характеристик и условий, воспроизводимых с помощью моделирующего устройства.

Можно выделить следующие основные компоненты адекватности моделей тренажера [1–3]:

- адекватность целей и условий;
- адекватность информационных потоков;
- динамическая адекватность (адекватность математического моделирования);
- эргономическая адекватность;
- психологическая адекватность.

На агрегатном уровне каждая из перечисленных видов адекватности проверяется и оценивается применительно к отдельным составляющим в конкретных расчетных случаях (РС). На системном уровне можно говорить об адекватности всех составляющих в одном из РС. На комплексном уровне приходится рассматривать адекватность всех компонентов применительно ко всей установленной системе РС. Исходя из этого, можно говорить об ограниченной адекватности на различных уровнях, например о частичном несоответствии одного или нескольких каналов в одном, двух или более РС.

Указанные компоненты адекватности не являются независимыми, а явно коррелированы между собой. Так, математическая и информационная адекватности могут в определенной мере рассматриваться в качестве составных частей эргономической адекватности. В то же время адекватность целей и условий служит важной предпосылкой информационной, математической и эргономической адекватности.

Структура адекватности целей и условий охватывает адекватность целей, адекватность состояний и адекватность условий. Первая из них предполагает возможность постановки одинаковых целей эксплуатации как на ЛА, так и на тренажере. При этом должна обеспечиваться одинаковая возможность достижения целей.

Адекватность состояний требует воспроизведения как нормальных (штатных) режимов работы, так и других (например, аварийных) состояний ЛА. При этом должна обеспечиваться не только имитация в тренажере тех же конфигураций отказов, что и на реальном объекте, но и адекватное изменение характеристик оборудования и процессов, происходящих при отказах на ЛА.

Аналогично этому адекватность условий требует воспроизведения не только тех же внешних возмущений со стороны среды по отношению к ЛА (например, условия видимости, турбулентность и температура атмосферы, состояние взлетно-посадочной полосы и т.д.), но и адекватной реакции на них оборудования и движения ЛА.

Информационную, эргономическую и динамическую адекватности целесообразно рассматривать в едином контексте. Для раскрытия их содержания следует сопоставить взаимодействие пилота с ЛА и его системами в реальном полете и в имитированных условиях на тренажере. Эти взаимосвязи осуществляются по информационным и исполнительным (операционным) каналам. По информационным каналам информация о полете и функционировании систем ЛА поступает к оператору. Воздействия, сформированные оператором на основе этой информации, в виде процедур пилотирования через управляющие органы и исполнительные каналы передаются на соответствующие системы, а затем – на ЛА в целом. В результате ЛА совершает целенаправленное движение в соответствии с программой полета, а его системы выполняют необходимые для этого функции.

2. Комплексная оценка адекватности моделей ЛА

В условиях полета на современном ЛА временные характеристики отдельных звеньев системы и пилота оказывают существенное влияние на качество управления.

На тренажере схема взаимодействия пилота с ЛА как объектом управления и внешней средой, включающая решение перечисленных задач в полном объеме, должна совпадать с описанной. Должны также совпадать временные и точностные характеристики. Однако из-за несоблюдения каких-либо условий адекватности могут иметь место определенные, иногда существенные отличия. Эти отличия могут сказаться на каждом шаге алгоритма деятельности пилота, а следовательно, на приобретаемых навыках.

При воспроизведении информационных потоков в тренажере отличия могут состоять как в ухудшении качества той или иной информационной составляющей, так и в возникновении запаздывания по отношению к действительности. Информационная адекватность может быть применена к каждой из перечисленных составляющих. В этом случае она оценивает соответствие имитируемых информационных потоков, воспроизводимых в тренажере, их реальному образу. Адекватность предполагает не только достаточно точную имитацию каждой отдельной составляющей, но и определенное, высокое качество воспроизведения, точный учет динамики ее изменения, а также синхронизацию информации, поступающей от различных источников, друг с другом и с динамическими компонентами полета. В связи с тем, что на тренажере можно за счет одних информационных потоков компенсировать недостатки и ограничения других (главным образом это относится к визуализации, компенсирующей в ряде случаев акселерационное воздействие), приходится говорить о комплексной информационной адекватности.

Эргономическая адекватность означает близкое соответствие между всеми элементами, характеризующими взаимодействие пилота с ЛА и его системами. В частности, должна иметь место адекватность реакции ЛА на управляющие воздействия от любого органа управления на тренажере и в полете. Необходимо также адекватное восприятие оператором этих реакций.

С другой стороны, эргономическая адекватность предполагает столь же близкое (по точности и времени) восприятие оператором отказов и возмущений, действующих на ЛА и его имитируемый образ. Заметим, что эргономическая адекватность может быть также названа операционно-функциональной.

Адекватность математического моделирования (динамических моделей) в тренажере является одной из доминирующих. При разработке подхода к оценке точности динамических моделей выдвигались следующие требования [4]:

- учет стохастической природы переменных объекта моделирования и модели;
- контроль качества модели на всех этапах проектирования, разработки, изготовления и внедрения;
- инвариантность относительно физической сущности рассматриваемых процессов;
- возможность описания любых (статических и динамических) различий процессов объекта и модели.

При общности указанных признаков рабочие критерии адекватности на различных этапах разработки и создания модели могут быть различными и отвечать конкретной сущности и целям данного этапа.

С точки зрения оценки качества процесс создания модели можно условно разделить на три этапа (табл. 1), каждому соответствует специальный (индивидуальный) критерий оценки качества.

Таблица 1

Этапы создания имитационной модели

Этап	Задача	Критерий
Идентификация	Разработка математических моделей и функциональных связей	Максимального правдоподобия
Имитация	Разработка и регрессионный анализ отдельных имитаторов	Регрессионного анализа (критерий Стьюдента и F -критерий Фишера)
Реализация	Реализация отдельных подсистем и модели в целом	Информационно-экспертный

В качестве обобщающего критерия будем использовать информационный критерий адекватности.

3. Информационный критерий адекватности

Рассмотрим количественные отношения, следующие из теории информации и применимые к вероятностно-статистическому подходу при комплексной оценке качества такой сложной системы, как модель ЛА

В теории информации вводится интегральная характеристика неопределенности, называемая энтропией. Энтропия непрерывного распределения вероятностных переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, x_2, \dots, x_n) \times \log_a p(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1)$$

является функционалом закона распределения вероятностей и учитывает особенности этого закона. Логарифм в выражении (1) может быть взят при любом основании $a > 0$. Теория информации рассматривает энтропию вероятностей в системах получения и передачи информации. При этом считается, что после получения информации о какой-либо величине распределение вероятностей этой величины и, следовательно, энтропия могут существенным образом измениться. Указанную энтропию обычно называют информационной энтропией. Информационная энтропия изменяется для данного наблюдателя по мере получения информации о рассматриваемом процессе. В теории автоматического регулирования также используется понятие энтропии процесса. Энтропия процесса и распределение вероятностей переменных этого процесса – объективные характеристики. Энтропию распределения вероятностей переменных какого-либо процесса нельзя изменить только путем измерения этих переменных с той или иной степенью точности. Таким образом, изменение энтропии при получении информации о каком-либо процессе нельзя смешивать с понятием энтропии самого процесса.

Приращение энтропии состояния процесса обусловлено разбросом переменных этого процесса. Разброс переменных процесса вследствие воздействия внешних и внутренних возмущений ограничен некоторым полем допуска $\pm\Delta$, в которое этот разброс должен уложиться. В статистике указанный разброс переменных называют вариацией переменных.

С точки зрения теории информации количество информации, получаемое в результате любого сообщения (в том числе и измерения переменных процесса), равно убыли неопределенности:

$$I = H(x) - H(x/x_n), \quad (2)$$

где $H(x)$ – первоначальная энтропия; $H(x/x_n)$ – условная энтропия, оставшаяся после получения информации.

Следовательно, характеристикой меры разброса переменных процесса является условная энтропия $H(x/x_n)$. Исходная неопределенность, т.е. безусловная энтропия $H(x)$, зависит только от распределения плотности вероятностей переменных самого процесса и не зависит от распределения плотностей вероятностей случайных возмущений, помех и погрешностей в каналах передачи и измерения информации.

А неопределенность, остающаяся после получения сообщения (результата измерения), т.е. условная энтропия $H(x/x_n)$, равна энтропии распределения плотности вероятностей переменных процесса, обусловленного вариацией переменных и погрешностью их измерения, и может быть найдена лишь на основании статистики распределения вариации переменных безотносительно к закону распределения вероятностей самих переменных. Вследствие этого дезинформационное действие вариации переменных зависит только от их законов распределения и может быть однозначно определено путем вычисления условной энтропии $H(x/x_n)$ этих законов.

Общеизвестно, что энтропия (дезинформационное действие) разброса переменных при заданном среднем квадратическом значении (заданной мощности вариации переменных) максимальна при нормальном законе распределения вероятностей вариации параметров.

Условная энтропия равна энтропии распределения плотности вероятностей переменных процесса, обусловленного вариацией переменных и погрешностью их измерения.

Однозначного соответствия между мощностью помехи (ее дисперсией) и вносимой ею дезинформацией не существует, так как при одной и той же мощности помехи вносимая ею дезинформация различна и зависит от вида закона распределения вероятностей этой помехи. В связи с этим вариацию переменных процесса необходимо характеризовать не их действительной мощностью, определяемой среднеквадратическим значением, а энтропийной мощностью, т.е. той частью мощности, которая вызывает потерю информации.

Энтропия (дезинформационное действие) разброса переменных при заданном среднеквадратическом значении (заданной мощности вариации переменных) и нормальном законе распределения вероятности вариации параметров:

$$H(x / x_n) = \ln \sigma \sqrt{2\pi e}. \quad (3)$$

В случае распределения вероятностей разброса переменных, близкого к равномерному, значение интервала неопределенности определяется выражением

$$H(x / x_n) = \int_{-\Delta}^{+\Delta} \frac{1}{2\Delta} \ln \frac{1}{2\Delta} dx = \ln 2\Delta, \quad (4)$$

где Δ – половина ширины интервала неопределенности.

Таким образом, распределение вероятностей разброса переменных с нормальным законом распределения имеет точно такое же дезинформационное действие, как и резко ограниченное равномерное распределение, если ширина интервала неопределенности равна

$$2\Delta = \sigma \sqrt{2\pi e}. \quad (5)$$

Из анализа выражений (3)–(5) следует, что если разброс переменных с произвольным законом распределения вероятностей имеет условную энтропию $H(x/x_n)$, то энтропийный интервал вариации переменных независимо от вида закона распределения будет определяться выражением

$$\Delta = (1/2) \exp[H(x/x_n)], \quad (6)$$

т.е. энтропийное значение разброса (вариации) переменных вычисляется как половина ширины эквивалентного по энтропии интервала вариации переменных с равномерным законом распределения вероятностей.

Таким образом, энтропийное значение вариации переменных дает возможность вариацию переменных с любым законом распределения вероятностей заменить вариацией переменных с резко ограниченным равномерным законом распределения вероятностей, но с тем же значением энтропии. Это позволяет заменить реальную полосу разброса переменных резко ограниченной полосой с равномерным законом распределения вероятностей, полностью эквивалентной реальной в информационном смысле. На основании этого могут быть получены объективные оценки вариации переменных объекта моделирования и объективно установлены погрешности модели по всем переменным. Из сказанного можно сделать вывод, что энтропийные оценки разброса переменных процесса, т.е. применение методов информационной

теории, позволяют выявить более полноценные и устойчивые критерии оценки качества модели, чем упоминавшиеся, поскольку они отражают более глубокие свойства вариации переменных как случайных величин.

Далее воспользуемся следующими соображениями [5].

Процесс и модель эквиваленты по количеству передаваемой информации в случае, если фазовая координата процесса ξ_{Π} и модели ξ_M отличаются на 2Δ , и

$$\max n_k - m_k \leq 2\Delta, \quad m_k - \min n_k \leq 2\Delta, \quad k = \overline{1, L}, \quad (7)$$

а также выполняется условие

$$H_{\Pi}(n / n_i) = H_M(m / m_i),$$

где n_k и m_k – подмножество переменных процесса и модели.

Сводя неравенства (7) к одному, можно получить необходимое и достаточное условие эквивалентности процесса и модели по переменной k для тренажера

$$|n_k - m_k| < 2\Delta_k, \quad (k = \overline{1, L_i}), \quad H_{\Pi}(n / n_i) = H_M(m / m_i). \quad (8)$$

Энтропийный критерий эквивалентности процесса и модели позволяет решить ряд важных вопросов моделирования, а именно определить допустимую глубину упрощения модели, ширину допустимых значений переменной для построения статистической или квазистатической модели, окончание переходов. Обобщенный показатель качества модели складывается из единичных информационных показателей качества по каждой переменной, значимость которой в моделируемой системе определяется методом ранговой корреляции.

Оценка информационного качества модели по энтропийному значению вариации переменных проводилась по показателю качества

$$\gamma_i = 1 - \left| \frac{\Delta_{i\Pi} - \Delta_{iM}}{\Delta_{i\Pi}} \right|, \quad (9)$$

где $\Delta_{i\Pi}$ – ширина энтропийного интервала вариации i -й переменной реального процесса, вычисленная с учетом допустимых отклонений этой переменной от номинального значения; Δ_{iM} – ширина энтропийного интервала вариации i -й переменной модели.

Допустимые отклонения для переменных, входящих в систему защит, должны приниматься равными не более $\pm 2\%$, для всех остальных переменных – не более $\pm 5\%$.

Обобщенный показатель качества модели ЛА можно определить выражением

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(g_i \gamma_i + 1)}{0,7}. \quad (10)$$

При $\sum_{i=1}^n g_i = 1$ обобщенный показатель качества модели находится в пределах $0 \leq K \leq 1$.

Этап проверки адекватности и комплексной наладки модели состоит из следующих частей:

- предварительная проверка логической, статической и динамической составляющих цифровой модели с определением отклонений от проектной документации;
- отладка отдельных имитаторов (частей программы) с устранением различного рода ошибок (логических, методических, технических и т.п.);
- комплексная наладка подсистем цифровой модели с проверкой правильности взаимодействия их между собой;
- приемочные испытания модели по специальной программе.

Таким образом, адекватность математического моделирования предусматривает необходимую близость характеристик управляемых процессов тренажера, т.е. его динамических свойств, к характеристикам прототипа при одинаковых возмущениях и близких управляющих воздействиях.

Смысл психологической адекватности можно определить из рассмотрения тренажера в качестве агрегированного комплекса имитаторов отдельных параметров (имитируется только то, что измеряется).

Каждый отдельный имитатор создает согласно инженерной психологии адекватный «стимул», управляющий оперативно-мыслительной и другой деятельностью. Сопряжение необходимого числа таких имитаторов в единую структуру образует эффективный с позиции психологической адекватности тренажер. Опирается указанная посылка на известную в инженерной психологии схему «стимул – управление – динамическая реакция». Реализация ее в тренажере и обеспечивает правильное формирование навыков и умений в оперативной деятельности.

Таким образом, на комплексном уровне общая адекватность тренажера может быть определена как некоторая функция:

$$P_{\text{общ}} = \Phi(P_{\text{ц}}, P_{\text{инт}}, P_{\text{инф}}, P_{\text{мат}}, P_{\text{эрг}}, P_{\text{псих}}),$$

где $P_{\text{ц}}$ – адекватность целей и условий; $P_{\text{инт}}$ – адекватность интерьера; $P_{\text{инф}}$ – информационная адекватность; $P_{\text{мат}}$ – адекватность математического моделирования; $P_{\text{эрг}}$ – эргономическая адекватность; $P_{\text{псих}}$ – психологическая адекватность.

В простейшем случае $P_{\text{общ}}$ может быть определена методом экспертных взвешенных коэффициентов. Область значений каждой составляющей P_i тренажера $0 \leq P_i \leq 1$ (в том числе и $P_{\text{общ}}$).

Таким образом, только математическое приближение отдельных составляющих к единице позволит сконструировать дидактически совершенный тренажер, обеспечивающий правильное формирование у летчика навыков и умений.

Уменьшение любой составляющей приводит к несоответствию между получаемой на тренажере информацией и ее истинным смыслом на реальном ЛА, созданию ошибочных иллюзий и неадекватным реакциям.

В работе [5] для комплексной оценки адекватности тренажера ЛА на основе выражения

$$R(t) - R_T(t) = A t \Delta_w e^{-\mu|t|} \sqrt{1 + \psi^2(t)} \sin[wt + \arctg \psi(t)],$$

где $\psi(t) = \frac{At\Delta_{\mu} - \Delta_A}{At\Delta_w}$, $\Delta_A, \Delta_{\mu}, \Delta_w$ – вариации соответствующих коэффици-

ентов корреляционных функций управляющих воздействий летчика, введена «мера адекватности управляющих воздействий летчика на летательном аппарате и тренажере» в следующем виде:

$$\rho = \left| \frac{A(\mu^2 - w^2)\Delta_{\mu} + 2Aw^2\mu\Delta_w - \mu(\mu^2 + w^2)\Delta_A}{(\mu^2 + w^2)^2} \right|. \quad (11)$$

Полученные выражения позволяют по-новому взглянуть на процесс оценки адекватности моделей при проектировании тренажерных средств качественной подготовки летных экипажей.

Заключение

Обеспечение комплексной адекватности – единственный путь разработки дидактически совершенных тренажеров, пригодных для качественной подготовки экипажей ЛА. Предложенная методика является теоретической основой для разработки нормативно-правой базы авиационного тренажеростроения.

Список литературы

1. **Меерович, Г. Ш.** Авиационные тренажеры и безопасность полетов / Г. Ш. Меерович, А. И. Годунов, О. К. Ермолов ; под ред. Г. Ш. Мееровича. – М. : Воздушный транспорт, 1990. – С. 343.
2. **Красовский, А. А.** Математическое моделирование динамики полета летательного аппарата : монография / А. А. Красовский, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во Пензенского филиала РГУ ИТП, 2008. – 260 с.
3. **Лапшин, Э. В.** Информационные модели проектирования интеллектуальных тренажеров широкого профиля / Э. В. Лапшин, А. В. Блинов, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2000. – № 8. – С. 23–27.
4. **Малашинин, И. И.** Тренажеры для операторов АЭС / И. И. Малашинин, И. И. Сидорова. – М. : Атомиздат, 1979. – 152 с.
5. **Годунов, А. И.** Мера адекватности управляющих воздействий летчика на летательном аппарате и тренажере / А. И. Годунов, В. И. Мандриков // Актуальные проблемы науки и образования : труды Международного юбилейного симпозиума. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2003. – Т. 2. – С. 201–205.

Годунов Анатолий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный
университет

E-mail: visvo@rambler.ru

Godunov Anatoly Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation and remote
control, Penza State University

Кемалов Берик Каирович

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: visvo@rambler.ru

Kemalov Berik Kairovich

Postgraduate student,
Penza State University

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

УДК 629.7.072.8

Годунов, А. И.

Обеспечение комплексной адекватности авиационных тренажеров /
А. И. Годунов, Б. К. Кемалов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 15–24.

АНАЛИЗ БАЗЫ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГЕБРЫ КОРТЕЖЕЙ

Аннотация. Рассматривается применение алгебры кортежей для определения возможностей OLAP транзакционной базы данных на примере анализа результатов деятельности сотрудников вуза.

Ключевые слова: алгебра кортежей, оперативный анализ данных, базы данных, C-кортеж.

Abstract. The article describes an approach to determine capabilities of OLAP through the instrumentality of cortege algebra by example of university staff activity results database.

Key words: cortege algebra, OLAP, database, C-cortege.

Введение

Любая организация стремится увеличить эффективность своей деятельности за счет внедрения современных информационных систем и технологий. Как правило, со временем база данных информационной системы организации накапливает существенный объем данных, которые могут быть проанализированы с целью получения новых сведений. Однако при проектировании транзакционных баз данных, как правило, такая возможность не учитывается, соответственно возникает вопрос о применимости и возможностях существующей транзакционной базы данных для анализа данных. Для ответа на данный вопрос используют прототипирование [1]. Как правило, для самых сложных и критичных функций разрабатывается программный код, чтобы определить возможность их реализации. Однако ответ на данный вопрос также может быть получен с помощью исследования схемы базы данных с применением алгебры кортежей (АК), которая дает возможность строить модели обработки данных, позволяя избежать трудозатрат на разработку программного кода.

1. Анализ связей базы данных с помощью АК

АК может использоваться для анализа базы данных различными способами. Часть анализа можно проводить, не углубляясь в структуру отношений, а рассматривая связи между ними. Для этой цели структуру базы данных удобно представить в виде системного графа. Граф, описывающий структуру базы данных результатов деятельности сотрудников вуза, представлен на рис. 1.

Вершины графа F , K , P , L , H соответствуют отношениям «факультет», «кафедра», «сотрудник», «учетные записи», «права доступа». В терминальных таблицах, соответствующих отношениям T_1 (кадровый потенциал), T_2 (учебная работа), T_3 (научная работа), хранятся значения меток шкал для оценки деятельности преподавателей. Отношения D_1 , D_2 , D_3 соответствуют результатам деятельности. Взаимосвязи между отношениями показаны дугами графа. Данный граф можно представить как C-систему, изоморфную матрице смежности этого графа [2]:

$$G[XY] = \begin{bmatrix} \{L\} & \{H\} \\ \{P\} & \{K\} \\ \{K\} & \{F\} \\ \{D_1\} & \{T_1, P\} \\ \{D_2\} & \{T_2, P\} \\ \{D_3\} & \{T_3, P\} \end{bmatrix}.$$

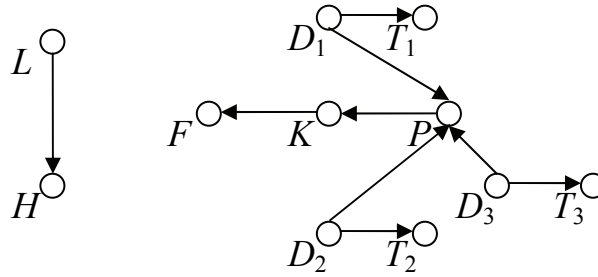


Рис. 1. Граф базы данных

На основе C -систем вычислим транзитивное замыкание графа:

$$G^+ = G \cup G^2 \cup G^3 = \begin{bmatrix} \{L\} & \{H\} \\ \{P\} & \{K\} \\ \{K\} & \{F\} \\ \{D_1\} & \{T_1, P\} \\ \{D_2\} & \{T_2, P\} \\ \{D_3\} & \{T_3, P\} \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} \{P\} & \{F\} \\ \{D_1\} & \{K\} \\ \{D_{21}\} & \{K\} \\ \{D_3\} & \{K\} \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} \{D_1\} & \{F\} \\ \{D_1\} & \{F\} \\ \{D_1\} & \{F\} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \{L\} & \{H\} \\ \{P\} & \{K, F\} \\ \{K\} & \{F\} \\ \{D_1\} & \{T_1, P, K, F\} \\ \{D_2\} & \{T_2, P, K, F\} \\ \{D_3\} & \{T_3, P, K, F\} \end{bmatrix}.$$

Транзитивное замыкание графа G^+ представлено на рис. 2.

Каждый C -кортеж в результирующей C -системе показывает возможности разбиения объектов реального мира, описываемых отношением из первого столбца C -системы, на группы в соответствии с признаками, задаваемыми элементами из второго столбца, а каждый элементарный кортеж соответствует такому варианту разбиения. Таким образом, элементарные кортежи соответствуют простейшему варианту разбиения, а C -кортежи соответствуют более сложному разбиению. Количество элементарных кортежей n , входящих

в C -кортеж, соответствует количеству возможных простейших разбиений и определяет количество возможных более сложных разбиений, равное $n!$. Используя терминологию многомерной модели данных, можно сказать, что максимальная «степень» композиции графа с самим собой соответствует максимальному уровню измерения, задаваемого отношением во втором столбце, для фактов, задаваемых отношением в первом столбце [3].

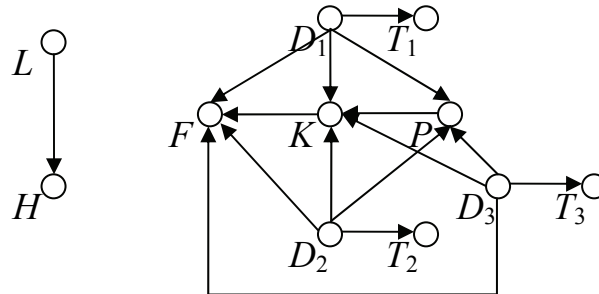


Рис. 2. Транзитивное замыкание графа базы данных

Данные, полученные с помощью АК, могут быть интерпретированы в терминах матроидов. C -системы $G[XY]$ и $G^+[XY]$ позволяют задать матроид графа G^+ . Множество элементарных кортежей C -системы $G^+[XY]$ задает множество дуг графа G^+ , объединение доменов $X \cup Y$ задает множество вершин графа. Первый элемент каждого элементарного кортежа C -системы $G^+[XY]$ соответствует началу дуги, а второй элемент элементарного кортежа соответствует концу дуги. Таким образом, можно задать матрицу инцидентности для графа, что позволяет задать соответствующий графовый матроид [4]. Независимые множества матроида будут являться подмножествами множества элементарных кортежей $G^+[XY]$, соответствующего носителю матроида [5]. Множество элементарных кортежей C -системы $G[XY]$ задает базис матроида, соответственно ранг матроида в данном случае равен количеству элементарных кортежей C -системы $G[XY]$. Об исследовании базы данных с помощью графового матроида будет написано в следующей статье.

2. Анализ отношений с помощью АК

Каждое отношение может быть представлено в алгебре кортежей как C -система, и становится возможным использование соответствующих операций. Каждое отношение в исследуемой базе данных имеет атрибут, соответствующий суррогатному ключу, обозначаемый как S^j , где j – имя отношения. Наличие в схемах двух отношений атрибутов, приписанных к одному сорту, позволяет вычислять их композицию и соединение. Для каждого элементарного кортежа C -системы, соответствующей транзитивному замыканию G^+ , возможно построение частного универсума, определяющего один из вариантов разбиения множества объектов на подмножества с целью проведения OLAP. Каждый такой частный универсум может быть получен с помощью операций соединения, перестановки атрибутов и элиминации атрибутов. Так, элемен-

тарному кортежу (K, F) соответствует отношение $R^{fk} [S^k, N^k, S^f, N^f]$, задающее разбиение кафедр по факультетам, где N^k – название кафедры, N^f – название факультета. В структурах АК данное отношение может быть получено следующим образом: для C -системы $K [S^k S^f N^k]$ выполним операцию перестановки атрибута, чтобы преобразовать его в C -систему $K [S^k N^k S^f]$, затем выполним операцию соединения отношения $F [S^f N^f]$ и отношения, задаваемого полученной C -системой:

$$R^{fk} [S^k, N^k, S^f, N^f] = F [S^f, N^f] \oplus K [S^k, N^k, S^f].$$

Частный универсум, задаваемый отношением R^{fk} , может быть описан как декартово произведение его атрибутов $R^{fk} = S^k \times N^k \times S^f \times N^f$, что позволяет рассматривать его в качестве гиперкуба с измерением S^f и тремя атрибутами информационного назначения. При добавлении в схему отношения $K [S^k S^f N^k]$ дополнительного атрибута, который может быть использован в качестве меры, становится возможным OLAP данного гиперкуба для получения более сложной информации, чем вычисление количества кафедр на факультете. При этом алгоритм задания отношения R^{fk} останется тем же, поскольку в этом случае отношение $K [S^k S^f N^k]$ может быть получено с помощью элиминации атрибута. Большая часть кортежей данного декартова произведения не будет иметь места в базе данных и может быть задана C -системой R^{fk} . В связи с большим объемом данных, содержащимся в такой системе, фактор наличия возможности использования сокращенного описания в используемой СУБД может быть критичным.

Покажем, как полученная структура АК может быть использована для описания процесса формирования списка кафедр, имеющих на факультете с названием «ФВТ». Формулировка в АК будет иметь вид

$$Q_1^{fk} [S^k, N^k, S^f, N^f] = [* * * \{\text{ФВТ}\}],$$

где фиктивные компоненты «*», обозначают множества, равные доменам соответствующих атрибутов [2].

Результирующей структурой является C -система, в каждом C -кортеже которой имеется единственный элементарный кортеж, поскольку между атрибутами S^k и N^k имеется функциональная связь.

Таким образом, можно определить C -систему, описывающую разбиение кафедр по факультетам, через объединение входящих в нее C -систем:

$$R^{fk} = \bigcup_{j=1}^m Q_j^{fk} [S^k, N^k, S^f, N^k] = [* * \{j\} *],$$

где m – количество факультетов в вузе; j – номер факультета.

Аналогичным образом построим отношения для остальных элементарных кортежей C -системы, соответствующей транзитивному замыканию G^+ . Элементарному кортежу (K, P) соответствует отношение $R^{kp}[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, S^f, N^k]$, задающее разбиение преподавателей по кафедрам, где N^p – имя сотрудника, O^d – ученая степень, O^p – должность, O^r – ученое звание.

Отношение R^{kp} получается как соединение отношений K и P :

$$\begin{aligned} R^{kp}[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, S^f, N^k] = \\ = K[S^k, S^f, N^k] \oplus P[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k]. \end{aligned}$$

Часто возникает ситуация, при которой возможны различные способы оперативного анализа данных единственного отношения. Рассмотрим отношение $P[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k]$. Атрибуты O^d, O^p, O^r определяют текстовое описание соответствующих характеристик. Так уменьшается количество обращений к базе данных и, соответственно, время обработки запроса, что имеет немаловажное значение в информационных системах, ориентированных на транзакционные базы данных. C -система, задающая отношение P , может быть разбита на составляющее ее C -системы при использовании O^d, O^p, O^r в качестве измерений гиперкуба, задаваемого отношением $P[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k]$.

Допустим, необходимо получить список всех доцентов вуза. Формулировка в АК будет иметь следующий вид:

$$Q_1^p[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k] = [* \ * \ * \ \{\text{доцент}\} \ * \ *].$$

Тогда C -система, соответствующая отношению $P[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k]$, может быть представлена как

$$\begin{aligned} P[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k] = \\ = \bigcup_{j=1}^m \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{l=1}^q Q_1^p[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k] = \begin{bmatrix} * & * & o_j^d & o_i^p & o_l^r & * \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где o_j^d – j -й элемент домена атрибута O^d ; o_i^p – i -й элемент домена атрибута O^p ; o_l^r – l -й элемент домена атрибута O^r ; m – кардинальность множества O^d ; n – кардинальность множества O^p ; q – кардинальность множества O^r .

Отношения, соответствующие C -системам, определяющим разбиение результатов деятельности на типы, можно записать следующим образом:

$$R^{d,t_i} [S_i^d, S^p, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U] = T_i [S_i^t, N_i^t, E, U] \oplus D_i [S_i^d, S^p, V_i^d, S_i^t],$$

где V_i^d – некоторое числовое значение, характеризующее результат деятельности сотрудников вуза, которое может быть агрегировано; N_i^t – название вида деятельности сотрудников вуза, к которому относится результат; E – название подтипа деятельности, к которому относится вид деятельности сотрудников вуза; U – тип пользователя, который является ответственным за учет вида деятельности сотрудников вуза, $i \in \{1, 2, 3\}$. В дальнейшем индекс i будет использоваться для записи отношений

Последовательное соединение нескольких отношений позволяет строить кросс-таблицы. Так, например, результаты деятельности сотрудников вуза удобно представить в виде таблицы, в которой названия столбцов соответствуют видам работ, выполняемых сотрудниками вуза, а названиям строк соответствуют имена сотрудников вуза. В этом случае результатам деятельности сотрудников вуза будут соответствовать ячейки таблицы. Соответствующее отношение может быть получено следующим образом:

$$\begin{aligned} R^{pd,t_i} [S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k] = \\ = P [S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k] \oplus R_i^{d,t_i} [S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, S^p]. \end{aligned}$$

Произведем соединение полученного отношения с отношением K :

$$\begin{aligned} R^{kpd,t_i} [S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, S^f, N^k] = \\ = K [S^k, S^f, N^k] \oplus R^{pd,t_i} [S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k]. \end{aligned}$$

С помощью полученного отношения можно построить кросс-таблицу, где строки, заголовки которых соответствуют названиям кафедр, будут состоять из множества подстрок, являющегося подмножеством множества строк полученной ранее таблицы:

$$R^{kpd,t_i} = \bigcup_{j=1}^n Q_1^{kpd,t_i} [* * * * * * * * * * \{j\} * *],$$

где n – количество кафедр в вузе, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Для каждой такой строки можно вычислить агрегированное значение. Пусть агрегирование V_i^d производится суммированием, тогда для хранения агрегированных данных потребуется задать отношение $R^a [A, S^k]$, где A – агрегированные значения для кафедр. Агрегированные данные будут представлять собой C -систему, полученную объединением C -кортежей:

$$\bigcup_{j=1}^n Q^a[\{g_j\} \{j\}],$$

где n – количество кафедр в вузе, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$; $g_j \in A$, $g_j = \sum V_i^{d'}$; $V_i^{d'}$ – множество всех элементов атрибута V_i^d C -системы, соответствующей результату выполнения запроса Q_1^{kpd, t_i} .

Кросс-таблица является одним из возможных способов представления данных, содержащихся в гиперкубе. Для удобства пользователя OLAP-системы предоставляют возможность проведения различных операций для изменения представления данных. Покажем на примере гиперкуба, задаваемого отношением R^{kpd, t_i} , как АК позволяет моделировать операции OLAP. К основным операциям OLAP относятся [6]:

- срез;
- вращение;
- консолидация;
- детализация.

Операция среза в АК равнозначна заданию значения одного или нескольких атрибутов отношения. Так, срез по элементу измерения «кафедра» со значением «МОиПЭВМ» и элементу измерения «ученая степень» со значением «доцент» осуществляется реализацией запроса

$$Q_2^{kpd, t_i} [* * * * * * * * \{\text{доцент}\} * * * * \{\text{МОиПЭВМ}\}].$$

Операция вращения, как правило, используется при изменении отображения данных, представленных в виде кросс-таблицы и может рассматриваться как совокупность операций обмена заголовков строк и столбцов местами и изменения порядка элементов с прямого на обратный. При этом вычисляются новые агрегированные значения, соответствующие новой структуре данных. Изменение порядка элементов в АК может быть реализовано в два шага. На первом шаге изменяется порядок вхождения C -кортежей в C -систему, а на втором шаге изменяется порядок элементов, составляющих множество, соответствующее атрибуту, для которого меняется порядок. При обмене заголовков строк и столбцов местами меняется порядок разбиения совокупности данных, входящих в C -систему.

Так, кросс-таблица, где заголовки столбцов соответствуют названиям кафедр и заголовки подстолбцов соответствуют именам сотрудников, а заголовкам строк соответствуют виды работ, может быть получена следующим образом:

$$R^{kpd, t_i} = \bigcup_{j=1}^n Q_3^{kpd, t_i} [* * \{j\} * * * * * * * * * * * * * *],$$

где n – количество видов работ типа i , $j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Алгоритм вычисления агрегированных значений при этом остается неизменным.

Операция консолидации возможна при наличии иерархии измерения и осуществляется комбинацией операций соединения отношений, элиминации атрибутов и вычисления агрегированных значений соответствующих фактов некоторым заданным способом. Так, в гиперкубе, задаваемом отношением $R^{fkpd_{it_i}}$, имеется измерение, для которого уровню измерения «кафедра» соответствует более высокий уровень «факультет». При выполнении операции консолидации сначала необходимо провести соединение с отношением, соответствующим более высокому уровню иерархии:

$$R^{fkpd_{it_i}} \left[S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f \right] = \\ = F \left[S^f, N^f \right] \oplus R^{fkpd_{it_i}} \left[S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f \right].$$

Затем выполняется операция элиминации атрибутов, соответствующих более низкому уровню иерархии:

$$\exists s^k \exists n^k R^{fkpd_{it_i}} \left[S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f \right].$$

На последнем этапе вычисляются новые агрегированные значения.

Осуществление операции консолидации возможно с помощью других алгоритмов, модель выполнения которых также можно построить с помощью АК.

Операция детализации производится аналогично операции консолидации с учетом того, что более высокий уровень иерархии заменяется более низким уровнем.

Аналогичным образом выполнение операций OLAP может быть показано на других данных.

Гиперкуб, задаваемый отношением $R^{fkpd_{it_i}}$, содержит данные обо всех результатах деятельности одного типа сотрудников вуза.

Поскольку частный универсум, задаваемый декартовым произведением $S_i^d \times S_i^t \times V_i^d \times S^p \times N^p \times O^d \times O^p \times O^r \times S^k \times N^k \times S^f \times N^f \times N_i^t \times E \times U$, может содержать значительно большее число элементов, чем C -система, соответствующая отношению $R^{fkpd_{it_i}}$, и требует для своего задания осуществления нескольких операций соединения, то при реализации сложных запросов к гиперкубу, задаваемому данным отношением, логично разбивать их на простые запросы. Так, запрос, формирующий список сотрудников факультета ФВТ, прошедших научную стажировку, может быть сформулирован как

$$Q_1^{fkpd_{it_i}} \left[S_{3i}^d, S_3^t, V_3^d, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f, N_3^t, E, U \right] = \left[\begin{array}{cccccccccccc} * & * & & & & & & & & & & & & & & & \\ * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \end{array} \right] \left\{ \text{ФВТ} \right\} \left\{ \text{научная_стажировка} \right\} \left[\begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \right].$$

При этом реализация может иметь вид $Q_1^{fkpd_{3t_3}} \cap R^{fkpd_{3t_3}}$, однако это потребует выполнения четырех операций соединения отношений, данные которых не были отфильтрованы, либо наличия сохраненного отношения $R^{fkpd_{3t_3}}$. В первом случае для обработки данных потребуется большое коли-

чество вычислительных операций и оперативной памяти, а во втором случае в базе данных будет храниться большой объем избыточных данных. Однако в первом случае количество требуемых вычислительных ресурсов можно сократить, осуществляя операции среза перед соединением:

$$\begin{aligned}
 1) \quad Q_2^f[S^f, N^f] &= [* \{ \Phi BT \}] \cap R^f[S^f, N^f]; \\
 2) \quad Q_3^{fk}[S^k, N^k, S^f, N^f] &= Q_2^f[S^f, N^f] \oplus K[S^k, N^k, S^f]; \\
 3) \quad Q_3^{fkp}[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f] &= \\
 &= Q_3^{fk}[S^k, N^k, S^f, N^f] \oplus P[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k]; \\
 4) \quad Q_2^{t3}[S_3^t, N_3^t, E, U] &= [* \quad * \quad \text{научная_стажировка} \quad *] \cap \\
 &\cap T_3[S_3^t, N_3^t, E, U]; \\
 5) \quad Q_2^{d3t3}[S_3^d, S^p, V_3^d, S_3^t, N_3^t, E, U] &= Q_2^{t3}[S_3^t, N_3^t, E, U] \oplus \\
 &\oplus D_3[S_3^d, S^p, V_3^d, S_3^t]; \\
 6) \quad Q_2^{fkpd3t3}[S_3^d, S_3^t, V_3^d, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f, N_3^t, E, U] &= \\
 &= Q_2^{d3t3}[S_3^d, V_3^d, S_3^t, N_3^t, E, U, S^p] \oplus \\
 &\oplus Q_3^{fkp}[S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f].
 \end{aligned}$$

Все доступные для анализа данные можно объединить в один OLAP-куб, в котором определены измерения $S_1^d, S_2^d, S_3^d, S_1^t, S_2^t, S_3^t, S^p, O^d, O^p, O^r, S^k, S^f, E, U$ и меры V_1^d, V_2^d, V_3^d :

$$\begin{aligned}
 &R^{fkpdt} [S_1^d, S_2^d, S_3^d, S_1^t, S_2^t, S_3^t, V_1^d, V_2^d, V_3^d, S^p, N^p, \\
 &O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f, N_1^t, N_2^t, N_3^t, E, U] = \\
 &= \bigcup_{i=1}^3 R^{fkpd;t_i} [S_i^d, S_i^t, V_i^d, S^p, N^p, O^d, O^p, O^r, S^k, N^k, S^f, N^f, N_i^t, E, U].
 \end{aligned}$$

Данный гиперкуб можно использовать для моделирования наиболее сложных операций обработки данных, однако при реализации запросов необходимо помнить о возможности оптимизации, представленной выше.

3. Анализ сортов атрибутов с помощью АК

Подходы, рассматривающие только связи между отношениями, и их атрибуты не дают возможности определить все доступные варианты анализа данных. Их можно дополнить с помощью анализа сортов атрибутов отношений. Рассмотрим права доступа к данным в отношениях базы данных.

Определим отношение, задающее права всех пользователей системы:

$$R^{lh} [S^h, S, U, B, S^l, N^l, A] = L [S^l, N^l, A] \oplus H [S^h, S, U, B, S^l],$$

где N^l – имя сотрудника; A – данные, необходимые для идентификации и аутентификации; S – значение, равное значению атрибута, соответствующего суррогатному ключу одного из отношений F, K, P ; B – значение, определяющее отношение, значение суррогатного ключа которого определяет значение S .

Атрибуты S^k, S^f, S^p, S приписаны к одному сорту:

$$S^k \cup S^f \cup S^p = S.$$

Соответственно возможно выполнение операций соединения отношений, содержащих атрибут S , и отношений, содержащих атрибуты S^k, S^f, S^p .

Таким образом, отношение, соответствующее C -системе данных определенного типа, доступных пользователю, может быть получено с помощью АК.

На первом этапе получим C -системы, соответствующие правам доступа пользователей к данным факультетов, кафедр и сотрудников:

$$1) Q_1^{lh} [S, S^h, U, B, S^l, N^l, A] = [* * * \{\text{факультет}\} * * *];$$

$$2) Q_2^{lh} [S, S^h, U, B, S^l, N^l, A] = [* * * \{\text{кафедра}\} * * *];$$

$$3) Q_3^{lh} [S, S^h, U, B, S^l, N^l, A] = [* * * \{\text{сотрудник}\} * * *].$$

Над полученными C -системами проведем операции добавления фиктивных атрибутов:

$$4) Q_1^{lh} [S, S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, S^h, U, N^p, O^d, O^p, O^r, N^k, N^f, B, S^l, N^l, A];$$

$$5) Q_2^{lh} [S, S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, S^h, U, N^p, O^d, O^p, O^r, N^k, N^f, B, S^l, N^l, A];$$

$$6) Q_3^{lh} [S, S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, S^h, U, N^p, O^d, O^p, O^r, N^k, N^f, B, S^l, N^l, A].$$

Проведем операции перестановки, элиминации атрибутов и добавления фиктивных атрибутов над C -системой, задаваемой отношением $R^{fkpd_i t_i}$:

$$7) R_1^{fkpd_i t_i} [S^f, S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, N^p, O^d, O^p, O^r, N^k, N^f, B, S^l, N^l, A];$$

$$8) R_1^{fkpd_{it_i}} \left[S^k, S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, N^p, O^d, O^p, O^r, N^k, N^f, B, S^l, N^l, A \right];$$

$$9) R_1^{fkpd_{it_i}} \left[S^p, S_i^d, V_i^d, S_i^t, N_i^t, E, U, N^p, O^d, O^p, O^r, N^k, N^f, B, S^l, N^l, A \right].$$

Вычислим C -системы, определяющие доступные данные в зависимости от значений множества, соответствующих атрибуту U , определяющему, от имени какого типа пользователя осуществляется доступ к данным:

$$10) Q_1^{lhfkpd_{it_i}} = Q_1^{lh} \cap R_1^{fkpd_{it_i}};$$

$$11) Q_2^{lhfkpd_{it_i}} = Q_2^{lh} \cap R_2^{fkpd_{it_i}};$$

$$12) Q_3^{lhfkpd_{it_i}} = Q_3^{lh} \cap R_3^{fkpd_{it_i}};$$

$$13) Q_4^{lhfkpd_{it_i}} = Q_1^{lhfkpd_{it_i}} \cup Q_2^{lhfkpd_{it_i}} \cup Q_3^{lhfkpd_{it_i}}.$$

Полученные C -системы для каждого i определяют OLAP-кубы, разделяющие доступ к данным в зависимости от пользователя системы.

Заключение

Таким образом, с помощью АК можно рассмотреть все возможности OLAP для транзакционной базы данных и принять решение о разработке соответствующих программных средств. В случае, если исследованных возможностей OLAP недостаточно, имеет смысл принять решение о разработке специального хранилища данных и исследовать его структуру с помощью АК, чтобы убедиться в соответствии возможностей анализа потребностям организации. При заполнении разработанного хранилища данных возможности OLAP транзакционной базы могут быть использованы при организации ETL-процесса. Таким образом, определение возможностей OLAP с помощью АК на этапе проектирования позволяет принимать решение о разработке, минуя часто встречающийся и трудоемкий этап прототипирования.

Список литературы

1. **Overmyer, S. P.** Revolutionary vs. Evolutionary Rapid Prototyping: Balancing Software Productivity and HCI Design Concerns / S. P. Overmyer // Proceedings of the Fourth International Conference on Human-Computer Interaction. – Elsevier Science, 1991. – P. 303–307.
2. **Кулик, Б. А.** Вероятностная логика на основе алгебры кортежей / Б. А. Кулик // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах – 2005 : труды Международной научной школы (28 июня – 1 июля 2005 г.). – СПб. : Изд-во СПбГУАП, 2005. – С. 406–412.
3. **Педерсен, Т. Б.** Технология многомерных баз данных / Т. Б. Педерсен, К. С. Йенсен // Открытые системы. – 2002. – № 1. – С. 45–50.
4. **Липский, В.** Комбинаторика для программистов : пер. с польск. / В. Липский. – М. : Мир, 1988. – 200 с.
5. **Харари, Ф.** Теория графов / Ф. Харари. – М. : Мир, 1973. – 300 с.
6. **Барсегян, А. А.** Методы и модели анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.

Белов Вадим Николаевич
аспирант, Пензенский
государственный университет
E-mail: oracool@gmail.com

Belov Vadim Nikolaevich
Postgraduate student,
Penza State University

Макарычев Петр Петрович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет
E-mail: makpp@yandex.ru

Makarychev Petr Petrovich
Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of computer
application and software,
Penza State University

УДК 004.652

Белов, В. Н.

Анализ базы данных с применением алгебры кортежей / В. Н. Белов,
П. П. Макарычев // Известия высших учебных заведений. Поволжский реги-
он. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 25–36.

СОСУЩЕСТВОВАНИЕ ГРУПП В СОСТАВЕ СООБЩЕСТВА ПРОГРАММНЫХ АГЕНТОВ

Аннотация. Приведены результаты экспериментов по созданию сообщества программных агентов из различных групп, являющихся по отношению друг к другу конкурентами и симбионтами. Выявлены условия устойчивости сосуществования групп в составе такого сообщества.

Ключевые слова: искусственная жизнь, сообщества программных агентов, сосуществование.

Abstract. The article introduces experiments' results on creation of software agents community consisting of various groups acting as competitors and symbionts to each other. The conditions of stable coexistence of groups in such community are also revealed.

Key words: artificial life, software agents communities, coexistence.

Введение

Основным условием самоорганизации является неравновесие [1]. Применительно к сообществам биологических или цифровых организмов это означает постоянную сменяемость поколений особей и генетическое разнообразие организмов. Большое значение при этом приобретают задачи обеспечения воспроизводства и сменяемости новых поколений особей с новыми генетическими признаками, из которых выживают наиболее приспособленные к текущей обстановке.

1. Воспроизводство цифровых организмов

Математические модели экологических систем позволяют сделать вывод о том, что эффективное воспроизводство является одним из необходимых условий победы в межвидовой борьбе [2, 3]. Эволюция живой природы привела к появлению полового размножения, при котором для рождения нового организма требуется генетический материал двух родителей. При таком условии перебор генетических вариантов остается направленным, перемещение по ландшафту приспособленности происходит плавно, а не скачкообразно.

Примечательно, что в моделях искусственной жизни Tierra и Avida цифровые организмы сами «изобретали» обмен генетическим материалом, хотя изначально это не закладывалось в их программу [4]. В большинстве моделей на основе мультиагентных систем используется или клонирование с мутацией, или обмен генетическим материалом между любыми двумя особями без учета половой принадлежности, которая как таковая не вводится в модель.

Недостатком клонирования является низкий темп эволюции, так как рекомбинация генов в этом случае невозможна, и все новые генетические признаки могут появиться только благодаря мутациям. Непосредственный обмен генетическим материалом требует синхронизации участвующих программных агентов. При невысокой концентрации агентов их встречи малове-

роютны, поэтому порождения потомства не происходит даже при соблюдении всех прочих условий. Для устранения этой ситуации можно ввести централизованный обмен информацией между агентами, что позволит агентам синхронизироваться, но смысл построения модели при этом теряется.

Исходя из этого автором в [5] была предложена собственная модель сообщества агентов, в которой формирование нового агента проходит через промежуточную стадию, подобно личиночной стадии у некоторых живых организмов. Эксперименты с моделью выполнялись с помощью разработанного автором программного обеспечения [6].

2. Сосуществование групп при воспроизводстве с личиночной стадией

В модели агенты представляют вид-хищник, разделенный на непересекающиеся группы n_1 и n_2 . Каждая из таких групп сама может рассматриваться как отдельный вид.

Цель агентов состоит в выполнении обработки файлов данных, которые рассматриваются как вид-жертва n_4 и не могут повторно использоваться в качестве входной информации. Поток данных поступает в систему с постоянной интенсивностью. За обработку одного файла данных агент получает плату ξ_0 , которая рассматривается как приращение запаса внутренней энергии w_e . «Аппетит» хищника считается неограниченным.

Агент может перемещаться в двумерном клеточном пространстве модели, каждая клетка разделена на бесконечное количество горизонтальных логических слоев, соответствующих видам агентов и данных. При перемещении агент уменьшает запас своей энергии на величину ξ_3 за одно перемещение. Если $w_e < \xi_2$ ($\xi_2 = 0$), то агент завершает работу (хищник умирает от голода). Если $w_e > \xi_1$, то агенты загружены работой и требуется увеличить их количество: хищник оставляет потомство. Агенты группы n_1 формируют «личинки» n_3 и уменьшают w_e на величину $\xi_4 = \xi_0$. Если агент группы n_2 , для которого $w_e > \xi_1$, находит в текущей клетке пространства «личинку» n_3 , он инициирует запуск нового агента, равновероятно принадлежащего n_1 или n_2 , теряя при этом ξ_4 единиц внутренней энергии. Новый агент получает от родителей изначальный запас внутренней энергии, равный $\xi_5 = 2\xi_4$. Таким образом, $w_e \in [\xi_2, \infty)$.

Для рассмотренной задачи можно составить математическую модель взаимодействия видов и групп типа Лотка – Вольтерра [5]:

$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = k_{11}n_4n_1 - k_{12}n_1 - k_{13}n_1^2 - k_{14}n_1n_2 + k_{15}n_2n_3 - k_{16}n_1, \\ \frac{dn_2}{dt} = k_{21}n_4n_2 - k_{22}n_2 - k_{23}n_2^2 - k_{24}n_1n_2 + k_{25}n_2n_3 - k_{26}n_2n_3, \\ \frac{dn_3}{dt} = k_{31}n_1 - k_{32}n_2n_3, \\ \frac{dn_4}{dt} = k_{41} - k_{42}(n_1 + n_2)n_4, \end{cases} \quad (1)$$

где $k_{11}n_4n_1, k_{21}n_4n_2$ – прирост биомассы n_1 и n_2 благодаря пожиранию n_4 ; $k_{12}n_1, k_{22}n_2$ – потери биомассы n_1 и n_2 ; $k_{13}n_1^2, k_{23}n_2^2$ – влияние внутривидовой конкуренции для n_1 и n_2 ; $k_{14}n_1n_2, k_{24}n_1n_2$ – влияние конкуренции между n_1 и n_2 ; $k_{15}n_2n_3, k_{25}n_2n_3$ – прирост благодаря воспроизводству; $k_{16}n_1, k_{26}n_2n_3$ – затраты на воспроизводство для n_1 и n_2 ; $k_{31}n_1$ – прирост для n_3 ; $k_{32}n_2n_3$ – потери в связи с трансформацией n_3 в n_1 или n_2 ; k_{41} – прирост n_4 ; $k_{42}(n_1 + n_2)n_4$ – гибель жертв в результате встреч с хищниками.

Под «биомассой» вида здесь и далее будем понимать суммарный запас внутренней энергии особей вида, а не количество особей.

Полагая $k_{11} = k_{21}, k_{12} = k_{22}, k_{13} = k_{23}, k_{14} = k_{24}, k_{15} = k_{25} = D$, получим, что

$$\frac{dn_1}{dt} = f(n_1, n_2, n_3, n_4) + [Dn_2n_3 - k_{16}n_1], \quad (2)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = f(n_2, n_1, n_3, n_4) + [Dn_2n_3 - k_{26}n_2n_3]. \quad (3)$$

Группы агентов n_1 и n_2 являются одновременно конкурентами и симбионтами. Если исключить $x_1 = [Dn_2n_3 - k_{16}n_1]$ и $x_2 = [Dn_2n_3 - k_{26}n_2n_3]$, то в соответствии с принципом конкурентного исключения Гаузе обе группы могут сосуществовать друг с другом бесконечно долго при условии приблизительного равенства биомасс. Вымирание одной группы может произойти в случае значительной (по сравнению с конкурентами) потери биомассы. Для рассматриваемой модели это является следствием неравенства $x_1 \neq x_2$.

В модели (1) вероятнее вымирание n_1 , так как агенты n_1 участвуют в воспроизводстве и тратят энергию безусловно при $w_e > \xi_1$, а затраты энергии n_2 обуславливаются встречей с «личинкой» n_3 .

Таким образом, если длительное время верно, что $n_2 \gg n_1$, то группа n_1 вымрет и процессы воспроизводства прекратятся (рис. 1). С другой стороны, при $n_1 \gg n_2$ произойдет то же самое, за исключением того, что вымрет вид n_2 . Это означает, что с увеличением интенсивности потока поступающих исходных данных количество агентов не увеличится, и данные будут обрабатываться медленнее.

Во избежание вымирания одной из групп n_1 и n_2 необходимо исключить устойчивость существенной разницы их биомасс и задать такие правила функционирования агентов, при которых они приступают к воспроизводству, только если $w_e \gg \xi_0$. На рис. 2 приведены графики изменения численностей групп популяции, полученные в результате вычислительного эксперимента с начальным условием соотношения биомасс $n_1 \gg n_2$, выполненного на сети тороидальной топологии из шести узлов. Интенсивность поступления данных $k_{41} = 20$ ед./с, $\xi_0 = 10$ ед., $\xi_1 = 200$ ед., $\xi_3 = 1$ ед., $\xi_4 = 20$ ед. Группы успеш-

но сосуществовали до момента времени $t = 24$, когда была прекращена генерация данных n_4 (цена деления оси времени для рис. 1–3 – 5 мин).

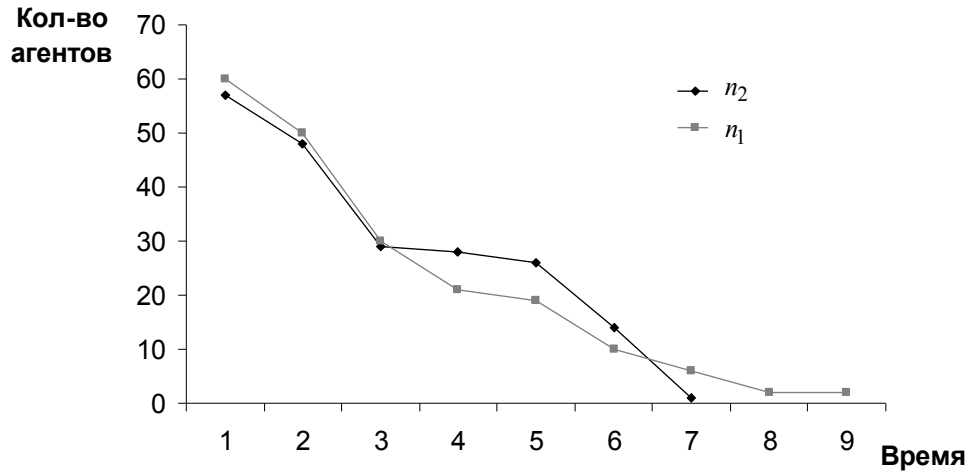


Рис. 1. Вытеснение группы n_2 группой n_1 при $\xi_1 / \xi_0 = 5$;
в начальный момент времени соотношение биомасс $n_1 \gg n_2$

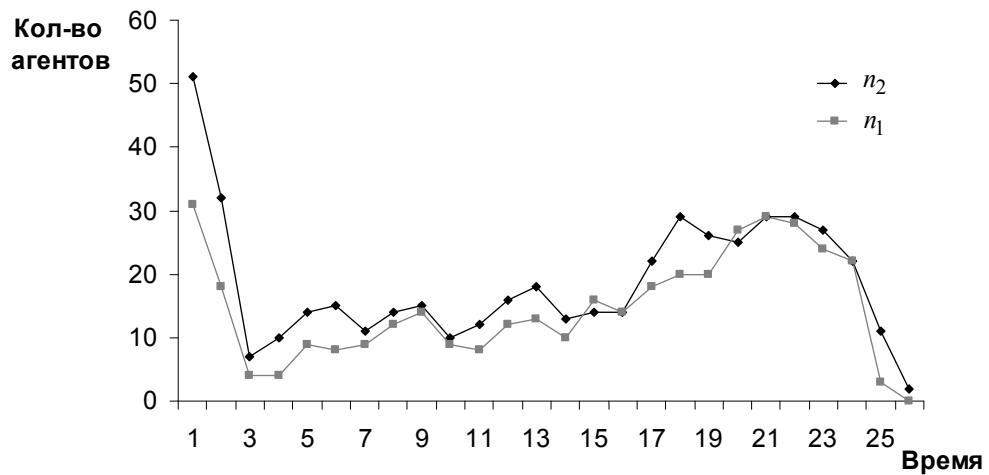


Рис. 2. Сосуществование n_1 и n_2 при $\xi_1 / \xi_0 = 20$;
в начальный момент времени соотношение биомасс $n_1 \gg n_2$

Таким образом, в рассмотренном случае сосуществование достигается, если $x_1 \approx x_2$ при $k_{11} = k_{21}$, $k_{12} = k_{22}$, $k_{13} = k_{23}$, $k_{14} = k_{24}$, $k_{15} = k_{25} = D$. Однако в живой природе реализуются и другие способы обеспечения сосуществования гендерных групп, например, благодаря диморфизму и дихронизму живые организмы разного пола имеют разные форму тела и скорости развития. Также может быть использовано временное прерывание контакта между n_1 и n_2 .

Однако введение таких механизмов регулирования в модель сообщества программных агентов представляется преждевременным, так как помимо

гендерных групп придется выделять и возрастные, а также учитывать наличие убежищ, что существенно усложнит модель (1).

3. Конкуренция с другими видами агентов

Сообщество агентов, построенное по модели (1), в котором достигнуто сосуществование групп n_1 и n_2 , заселившее все доступное пространство модели и достигшее насыщения, оказывается устойчивым к вторжению конкурентов с теми же потребностями. Конкуренты гибнут от недостатка пищевых ресурсов (для агентов нет работы и нет платы за нее).

Однако возможна и обратная ситуация, когда гибнет исходное сообщество агентов вида A , состоящее из групп n_1 и n_2 , при вторжении вида B , в котором нет разделения на гендерные группы, но каждый агент может вести себя и как n_1 , и как n_2 в зависимости от наличия «личинки» n_3 в текущей клетке пространства. В экспериментах для полного вытеснения вида A оказывалось достаточно одного агента вида B .

4. О смене поколений в модели

В рассматриваемой модели агент потенциально мог действовать бесконечно долго. Условием прекращения работы агента было отсутствие запаса внутренней энергии. Помимо этого, в ходе экспериментов некоторые случайно выбранные агенты уничтожались, чтобы избежать перегрузки сети.

Отсутствие явных ограничений срока существования и значения w_e привело к появлению «монополистов», которые истребляли почти все имеющиеся пищевые ресурсы и имели высокие значения запаса энергии (рис. 3). Эти агенты оказывались фактически бессмертными и существовали до окончания моделирования. Как правило, в роли «монополистов» оказывались агенты, принадлежавшие первым десяти поколениям. Идентифицировать «монополистов» позволяли уникальные имена, присваиваемые каждому агенту.

После того как в модели появлялись «монополисты», фактически прекращалось улучшение приспособленности, так как новые агенты гибли, успев только растратить полученный при рождении запас энергии. Выходом в данной ситуации является ограничение или «аппетита» агентов, или срока их существования.

Заключение

Модели математической биологии и экологии широко используются в теории искусственной жизни для оценки и предсказания свойств моделей искусственных миров, населенных сообществами программных агентов. С другой стороны, модели теории искусственной жизни могут применяться для исследования биологических и социальных явлений. Они помогают понять, для чего необходимы смерть, кооперация, альтруизм, забота о потомстве, как происходит накопление и перераспределение богатств. Возможно, исследования с использованием этих моделей позволят предложить новые ответы на важнейшие философские вопросы, которые всегда задавало себе человечество: кто мы такие, где наши истоки и какова цель нашего существования [7].

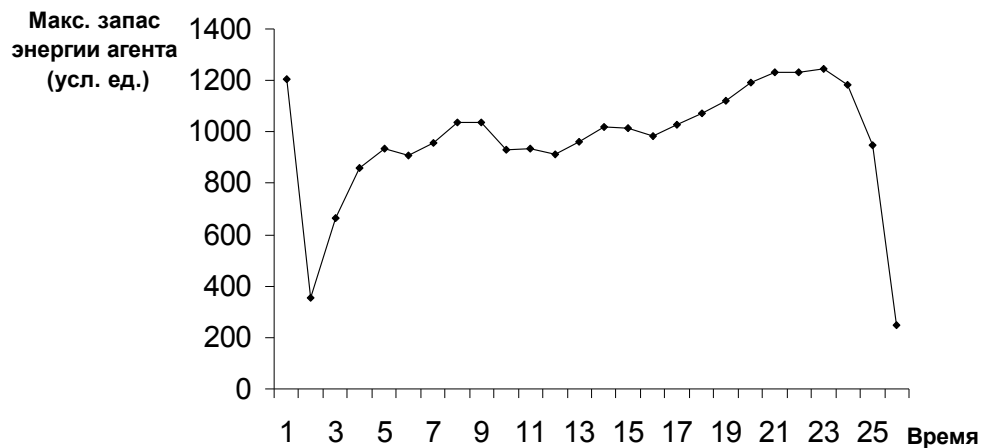


Рис. 3. Максимальный запас энергии агента для эксперимента, приведенного на рис. 2.

Список литературы

1. Руденко, А. П. Самоорганизация и синергетика / А. П. Руденко. – URL: http://utc.uni-dubna.ru/~mazny/students/site2/ideal_2.htm.
2. Гаузе, Г. Ф. Борьба за существование / Г. Ф. Гаузе. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с.
3. Мартюшев, Л. М. Развитие экосистем и современная термодинамика / Л. М. Мартюшев, Е. М. Сальникова. – Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. – 80 с.
4. Эвери, Д. Теория информации и эволюция / Д. Эвери. – Москва ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» ; Институт компьютерных исследований, 2006. – 252 с.
5. Кольчугина, Е. А. Влияние алгоритмов порождения процессов-особей на свойства модели поведения программного обеспечения / Е. А. Кольчугина // Современные информационные технологии : труды Международной научно-технической конференции (Computer-based conference) / под ред. В. Б. Моисеева, Л. Г. Когельмана, С. В. Трубицкова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технолог. академии, 2006. – Вып. 3. – С. 47–51.
6. Программная платформа для сборки и выполнения эволюционирующих программных агентов Padme Server Yule v.1.4 / Кольчугина Е. А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.06.2009 г., рег. № 2009613158 // Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем (RU ОБПБТ) № 3 (68), ч. 2. – М. : ФИПС, 2009. – С. 340.
7. Лем, С. Не буду служить / С. Лем // Библиотека XXI века : сборник : пер. с польск. – М. : АСТ, 2004. – 602 с.

Кольчугина Елена Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математического обеспечения
и применения ЭВМ, Пензенский
государственный университет

E-mail: kea@pnzgu.ru

Kolchugina Elena Anatolyevna

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of computer application and software,
Penza State University

УДК 004.42

Кольчугина, Е. А.

Существование групп в составе сообщества программных агентов / Е. А. Кольчугина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 37–43.

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ IEC 61499 НА ОСНОВЕ МЕТОДА Model Checking¹

Аннотация. Предлагается подход к верификации управляющих приложений международного стандарта IEC 61499 на основе метода *Model Checking*. В рамках данного подхода предлагается формальная модель переходов состояний системы в виде правил изменения функций. Рассматривается демонстрационный пример.

Ключевые слова: верификация, символьная модель, функциональный блок, стандарт IEC 61499.

Abstract. The article describes an approach to verification of IEC 61499 control applications on the basis of the Model Checking method. In the scope of the approach, the authors suggest a formal model of system conditions transition in the form of functions changing rules. The article considers a demonstration example.

Key words: verification, symbolic model, function block, standard IEC 61499.

Введение

Верификация является одним из основных этапов в проектировании управляющего программного обеспечения (ПО) [1], что, в частности, объясняется повышенными требованиями к надежности ответственных систем управления. Для проектирования промышленных систем управления нового поколения, характеризующихся распределенностью, интеллектуальностью и способностью к реконфигурации, был разработан международный стандарт IEC 61499 [2], являющийся преемником стандарта IEC 61131-3 и ориентированный на проектирование систем управления на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Основным артефактом проектирования в IEC 61499 являются функциональные блоки (ФБ), что во многом определяет особенности моделирования и верификации управляющего ПО на основе IEC 61499.

Большое признание в настоящее время получила верификация на основе метода *Model Checking* [1], а среди инструментальных средств поддержки – система *SMV* [3, 4]. Одна из реализаций *SMV* (*NuSMV* [4]), кроме верификации, позволяет проводить также и имитационное моделирование. Следует отметить, что система *SMV* успешно использовалась для верификации во многих областях разработки аппаратуры и ПО, в частности, в промышленности при верификации ФБ стандарта IEC 61131-3 [5].

Существует два основных подхода к моделированию систем ФБ на *SMV*:

- 1) моделирование ФБ с использованием промежуточной модели и ее последующее представление на *SMV*;
- 2) прямое представление ФБ на *SMV*.

Наиболее широко освещены в литературе этапы первого подхода. Например, в [6] представлен метод моделирования ФБ IEC 61499 с использо-

¹ Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)», № гос. регистрации НИР 01200952061.

ванием NCES-сетей, а в [7] – метод моделирования NCES-сетей на SMV. Работы по второму направлению практически отсутствуют.

Можно выделить два подхода к разработке моделей в системе SMV. Первый подход предполагает использование концепции модулей. Другой подход ориентирован на явное определение всех возможных переходов в системе. Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки. Но в дальнейшем будем ориентироваться на второй подход, поскольку он обеспечивает наибольшую скорость процесса верификации.

В данной работе предлагается формальная модель переходов состояний приложений IEC 61499 в виде правил изменения функций. Данную модель можно считать развитием формальной модели, предложенной в [8], в направлении внедрения в нее различных семантик выполнения [9]. Она ориентирована на верификацию в системах символического моделирования и прежде всего в системе SMV. В этом смысле формальную модель системы ФБ можно считать *метамоделью*, которая описывает все конкретные SMV-модели любой системы ФБ. В модели в определенной мере используется концепция модулей, что на уровне представления является вполне возможным. В работе рассматривается пример, демонстрирующий использование формальной модели в процессе верификации на основе SMV.

1. Соглашение о нотации

Пусть A – некоторое множество (однотипных) объектов (например, переменных). Область допустимых значений объектов из A будет обозначаться $Dom(A)$. Для обозначения функций значений объектов будет использоваться символ Z , при этом название самого объекта будет указано в индексе, например: Z_A . Пусть $Z_A: A \rightarrow Dom(A)$ – функция, назначающая значения объектам из A . Тогда $[Z_A]$ будем обозначать множество всех возможных функций Z_A . Число возможных функций из $[Z_A]$ определяется как число размещений с повторениями из n по k и равно n^k , где $k = |A|$, $n = |Dom(A)|$. Наличие взаимно однозначного соответствия между множествами A и B показывается как $A \leftrightarrow B$.

Придерживаясь концепции и нотации машин абстрактных состояний Ю. Гуревича [10], введем оператор обновления функции, обозначив его $\leftarrow$. Данный оператор может быть определен следующим образом:

$$Z_A(a) \leftarrow b \triangleq (Z_A \setminus (a, x)) \cup (a, b),$$

где $a \in A$; $b, x \in Dom(A)$; Z_A – график функции.

В дальнейшем для унификации изложения переходы будем представлять в виде продукционных правил. В консеквентах правил возможно использование одновременно выполняемых обновлений функций. Они будут разделяться знаком «;». Общий вид правила: $p_t^{id} : c \Rightarrow a_1; a_2; \dots; a_n$, где c – условие применения правила; $a_1, a_2, \dots, a_n$ – действия по изменению переменных; t – тип правила; id – идентификатор правила в типе. Для представления операции параллельного обновления группы однотипных функций используется знак Ξ . Поскольку предлагаемая модель имеет дело с глобальными состояниями, то обозначения переменных должны быть приведены в соответствии с глобальной идентификацией. Это может быть сделано, например, при помощи соответствующих индексов. Чтобы не перегружать формальную мо-

дель чрезмерной индексацией, в дальнейшем (если это не нарушает однозначности) будем использовать локальные обозначения переменных, принятых в определении переменных типа ФБ. Это возможно, поскольку в большей части изменения переменных производятся только в *локальных областях* и чаще всего в пределах ФБ.

2. Переменные для моделирования типа базисного ФБ

Набор переменных для моделирования базисного ФБ определяется следующим кортежем:

$$V_B = (EI, EO, VI, VO, VV, VIB, VOB, Q, DomQ, S, NA, NI, \omega, \alpha, \beta),$$

где $EI = \{ei_1, ei_2, \dots, ei_{N_{EI}}\}$ – множество (внешних) входных событийных переменных модуля базисного ФБ (МБФБ), $Dom(EI) = \{true, false\}$;

$EO = \{eo_1, eo_2, \dots, eo_{N_{EO}}\}$ – множество (внешних) выходных событийных переменных МБФБ, $Dom(EO) = \{true, false\}$;

$VI = \{vi_1, vi_2, \dots, vi_{N_{VI}}\}$ – множество (внешних) входных информационных переменных МБФБ, $Dom(VI) = N$, где N – множество целых чисел;

$VO = \{vo_1, vo_2, \dots, vo_{N_{VO}}\}$ – множество (внешних) выходных информационных переменных МБФБ, $Dom(VO) = N$;

$VV = \{vv_1, vv_2, \dots, vv_{N_{VV}}\}$ – множество внутренних переменных МБФБ, $Dom(VV) = N$;

$VIB = \{vib_1, vib_2, \dots, vib_{N_{VIB}}\}$ – множество внешних буферов, связанных с входными переменными, $|VIB| = |VI|$, $VIB \leftrightarrow VI$, $Dom(VIB) = N$;

$VOB = \{vob_1, vob_2, \dots, vob_{N_{VOB}}\}$ – множество внешних буферов, связанных с выходными переменными, $|VOB| = |VO|$, $VOB \leftrightarrow VO$, $Dom(VOB) = N$;

Q – переменная текущего EC -состояния;

$DomQ = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ – множество состояний диаграммы ECC ;

S – переменная текущего состояния OSM -машины, $Dom(S) = \{s_0, s_1, s_2\}$;

NA – указатель (счетчик) текущей EC -акции, $Dom(NA) = \{0, 1, \dots, \max_{q_i \in Q} N_Q^{q_i}\}$, где $N_Q^{q_i}$ – число EC -акций в состоянии q_i ; если $NA = 0$, то

считается, что ни одна из EC -акций не находится в стадии исполнения;

NI – указатель (счетчик) текущего шага алгоритма, $Dom(NI) = \{0, 1, \dots, \max_{q_i \in Q, j \in 1, N_Q^{q_i}} N_{NI}^{q_i, j}\}$, где $N_{NI}^{q_i, j}$ – число шагов в алгоритме j -й EC -акции

в состоянии q_i ; если $NI = 0$, то считается, что алгоритм закончил свое выполнение;

ω – признак окончания передач сигналов в объемлющем ФБ, $Dom(\omega) = \{true, false\}$;

α – признак запуска модуля диспетчером, $Dom(\alpha) = \{true, false\}$;

β – признак окончания работы модуля, $Dom(\beta) = \{true, false\}$.

Для удобства обозначим $V = VI \cup VV \cup VO$.

3. Переменные для моделирования типа составного ФБ

Набор переменных для моделирования составного ФБ определяется следующим кортежем:

$$V_C = (EI, EO, VI, VIB, VOB, FBD, \omega, \alpha, \beta),$$

где $EI, EO, VI, VIB, VOB, \alpha$ и β имеют тот же смысл, что и в V_B ; $FBD = \{fbd_1, fbd_2, \dots, fbd_n\}$ – множество описаний компонентных ФБ, входящих в модуль составного ФБ; $fbd_i = (fb_i, EI_i, EO_i, VC_i, VO_i, \alpha_i, \beta_i)$, fb_i – идентификатор компонентного ФБ; EI_i и EO_i – множество входных и выходных событийных переменных i -го компонентного ФБ соответственно; VC_i – множество входных константных переменных i -го компонентного ФБ; VO_i – множество выходных переменных i -го компонентного ФБ; α_i – признак запуска компонентного ФБ диспетчером составного ФБ; β_i – признак окончания работы компонентного ФБ;

$$\omega \triangleq \bigwedge_{eo_j^k \in \bigcup_i EO_i} \overline{Z_{EO}(eo_j^k)} \wedge \bigwedge_{ei_j \in EI} \overline{Z_{EI}(ei_j)} -$$

условие окончания передач сигналов в составном ФБ.

Для сокращения размерности модели *собственные* входные переменные VI_i компонентного ФБ не используются. Их представителями являются входные переменные модуля (VI), выходные ($VO_i, i = 1, \dots, N_{FB}$) или входные константные переменные ($VC_i, i = 1, \dots, N_{FB}$) компонентных ФБ. То же самое относится и к выходным переменным составного ФБ (VO). Их представителями являются соответствующие переменные из множеств $VO_i, i = 1, \dots, N_{FB}$.

Введем функцию $repr_{VI}$, позволяющую определить представителей входных переменных компонентных ФБ:

$$repr_{VI} : \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VI_i \rightarrow VI \cup VC \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VO_i.$$

Введем функцию $repr_{VO}$, определяющую представителей выходных переменных МСФБ:

$$repr_{VO} : VOB \rightarrow \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VO_i.$$

Существуют следующие взаимно однозначные соответствия между переменными i -го компонентного ФБ и соответствующего ему модуля x :

$$EI_i \leftrightarrow EI^x; EO_i \leftrightarrow EO^x; VO_i \leftrightarrow VOB^x; \bigcup_{vi \in VI_i} repr_{VI}(vi) \leftrightarrow VIB^x.$$

Соответствие между представителями выходных переменных и выходными буферами $\bigcup_{vob \in VOB} repr_{VO}(vob) \leftrightarrow VOB$ физически выражается в наличии явных передач данных между этими типами переменных.

4. Формальная модель системы ФБ в виде системы переходов

Перед верификацией система ФБ должна быть развернута (*unfolded*). Процесс развертывания системы ФБ заключается в создании экземпляра для каждого компонентного ФБ (в соответствии с его типом). В результате развертывания получается древовидная структура, узлами которой являются экземпляры ФБ [8]. В данном разделе ограничимся рассмотрением систем ФБ, функционирующих согласно *циклической* модели выполнения [9]. Этого будет достаточно, чтобы понять общие принципы построения моделей систем ФБ. Все переходы в системе ФБ можно разбить на группы, которые имеют вполне определенную семантику.

Введем следующие предикаты: $GuardCond: [Z_Q] \times [Z_Q] \times [Z_V] \rightarrow \{true, false\}$ – предикат, определяющий сторожевые условия *EC*-переходов; $TranCond: [Z_Q] \times [Z_Q] \times [Z_{EI}] \times [Z_V] \rightarrow \{true, false\}$ – предикат, определяющий условия *EC*-переходов. Выражение $TranCond(q_i, q_j, Z_{EI}, Z_V)$ будет истинным, если из *EC*-состояния q_i разрешен переход в *EC*-состояние q_j при текущих значениях событийных и информационных переменных ФБ. Имеет место $TranCond(q_i, q_j, Z_{EI}, Z_V) \equiv Z_{EI}(ei_k) \wedge GuardCond(q_i, q_j, Z_V)$, если существует ei_k – входная событийная переменная, используемая в *EC*-переходе (q_i, q_j) , и $TranCond(q_i, q_j, Z_{EI}, Z_V) \equiv GuardCond(q_i, q_j, Z_V)$ иначе. Определим отношение *EC*-переходов в базисном ФБ: $RT \subseteq Q \times EI \times Q$.

Рассмотрим каждый из переходов системы отдельно. Для рассмотрения переходов типа «Срабатывание *EC*-перехода» введем предикат $isAct: Q \rightarrow \{true, false\}$, определяющий, содержит *EC*-состояние *EC*-акции или нет.

В случае, когда условие *EC*-перехода включает событие $((q_i, ei_k, q_j) \in RT)$ и целевое *EC*-состояние содержит *EC*-акции ($isAct(q_j) = true$), правило, выражающее переход данного типа, имеет следующий вид:

$$T_{FT}^{B,1}[i, j]: Z_Q(Q) = q_i \wedge Z_S(S) = s_1 \wedge TranCond(q_i, q_j, Z_{EI}, Z_V) \Rightarrow \\ \Rightarrow Z_Q(Q) \leftarrow q_j; Z_S(S) \leftarrow s_2; Z_{EI}(ei_k) \leftarrow false; Z_{NA}(NA) \leftarrow 1; Z_{NI}(NI) \leftarrow 1.$$

Существует несколько стратегий съема данных. Для рассмотрения перехода типа «Синхронный съем данных» введем функцию (инъективное отображение) $f_{EV}: 2^{N_{EI}} \rightarrow 2^{N_{VI}}$, ставящую в соответствие множеству входных событий множество входных переменных, для которых они производят съем данных. Данная функция строится следующим образом:

$$(EI_i, VI_j) \in f_{EV}, \text{ если } VI_j = \bigcup_{ei_k \in EI_i} \{vi_m \mid (ei_k, vi_m) \in IW\},$$

где $IW \subseteq EI \times VI$ – множество *WITH*-связей входного интерфейса.

Определим множества входных переменных VI_j , для которых может быть проведен съем данных: $\bigcup_{VI_j \in Pr_2 f_{EV}} VI_j$, где $Pr_2 f_{EV}$ – вторая проекция гра-

фика функции f_{EV} . Для каждого множества входных переменных $VI_j \in Pr_2 f_{EV}$ определим множество множеств входных событий, съем данных которых они иницируют: $EI^j = \{EI_k \mid (EI_k, VI_j) \in f_{EV}\}$.

Число переходов типа «Синхронный съем данных» будет равно $|\text{Pr}_2 f_{EV}|$.

Правило, представляющее один переход для синхронного съема данных по отношению к множеству входных переменных VI_j , будет следующим:

$$\begin{aligned} T_{SD}^1[j]: Z_\alpha(\alpha) \wedge Z_S(S) = s_0 \wedge \bigvee_{EI_k \in EI^j} \bigwedge_{ei_m \in EI_k} Z_{EI}(ei_m) \wedge \bigwedge_{ei_k \notin EI_k} \overline{Z_{EI}(ei_k)} \Rightarrow \\ \Rightarrow \bigvee_{vi_i \in VI^j} (Z_{VI}(vi_i) \leftarrow Z_{VOB}(pre_{VI}(vi_i))); Z_S(S) \leftarrow s_1, \end{aligned}$$

где $pre_{VI}: \bigcup_{ifb_i \in IFB_b} VI^i \rightarrow \bigcup_{ifb_i \in IFB} VO^i$ – глобальная функция, позволяющая

определить для каждой входной переменной экземпляра базисного ФБ соответствующий ей буфер данных, где VI^i – множество входных переменных i -го экземпляра базисного ФБ; VO^i – множество выходных переменных i -го экземпляра ФБ.

Для реализации перехода «Выполнение шага алгоритма» введем предикат, определяющий условие разрешенности шага алгоритма:

$$CondStep: [Z_{NI}] \times [Z_{NA}] \times [Z_Q] \times [Z_V] \rightarrow \{true, false\}.$$

Переходы типа «Выполнение шага алгоритма» могут быть представлены в виде следующего множества правил:

$$\begin{aligned} \{T_{EX}[i, j, k]: Z_S(S) = s_2 \wedge Z_Q(Q) = q_i \wedge Z_{NA}(NA) = j \wedge Z_{NI}(NI) = k \wedge \\ CondStep(k, j, q_i, Z_V) \Rightarrow \bigvee_{vo_m \in VO^{q_i, j, k}} (Z_{VO}(vo_m) \leftarrow t_{VO_m}(Z_V, Z_S, Z_Q, Z_{NA}, Z_{NI})); \\ \bigvee_{vv_m \in VV^{q_i, j, k}} (Z_{VV}(vv_m) \leftarrow t_{VV_m}(Z_V, Z_S, Z_Q, Z_{NA}, Z_{NI})); \\ Z_{NI}(NI) \leftarrow nextSt(q_i, j, k, Z_V) | q_i \in Q^A, j \in NA^{q_i}, k \in NI^{q_i, j}\}, \end{aligned}$$

где $VO^{q_i, j, k}$ и $VV^{q_i, j, k}$ – множество выходных и внутренних переменных базисного ФБ, изменяемых в k -м шаге алгоритма j -й EC -акции в EC -состоянии q_i соответственно; $Q^A = \{q \in Q | isAct(q)\}$ – множество EC -состояний, к которым прикреплены EC -акции; NA^{q_i} – множество номеров EC -акций в EC -состоянии q_i , в которых может производиться изменение переменных; $NI^{q_i, j}$ – множество номеров шагов в j -й EC -акции в EC -состоянии q_i , в которых может производиться изменение переменных.

Множество правил, представляющих переходы типа «Завершение EC -акций (с выдачей выходного сигнала и с выдачей данных)», приведено ниже:

$$\{T_{CA}^3[k]: Z_S(S) = s_2 \wedge Z_{NI}(NI) = 0 \wedge$$

$$\begin{aligned} & \bigwedge_{q_i \in Q^{eo_k}, j \in NA^{q_i, eo_k}} (Z_Q(Q) = q_i \wedge Z_{NA}(NA) = j) \Rightarrow \\ & \Rightarrow Z_{NA}(NA) \leftarrow 0; Z_{EO}(eo_k) \leftarrow true; \quad \bigvee_{(eo_k, vo_m) \in OW} Z_{VOB}(vob_m) \leftarrow Z_{VO}(vo_m) \\ & \quad | \quad eo_k \in EO, \exists (eo_k, vob_m) \in OW \}, \end{aligned}$$

где $Q^{eo_k} \subseteq Q$ – множество *ЕС*-состояний, хотя бы в одной *ЕС*-акции которых выдается выходной сигнал eo_k ; NA^{q_i, eo_k} – множество номеров *ЕС*-акций *ЕС*-состояния q_i , которых выдается выходной сигнал eo_k .

Выполняемые действия в данном переходе:

- 1) сброс счетчика *ЕС*-акций в ноль;
- 2) установка выходной событийной переменной, чем и определяется факт выдачи выходного сигнала;
- 3) выдача выходных данных наружу блока, что выражается в записи значений выходных переменных, связанных *WITH*-связями с выходным событием, в соответствующие буфера данных.

Переход «Завершение *ЕС*-состояния» выражается простым правилом:

$$T_{CS} : Z_S(S) = s_2 \wedge Z_{NA}(NA) = 0 \Rightarrow Z_S(S) \leftarrow s_1; Z_{NA}(NA) \leftarrow 1; Z_{NI}(NI) \leftarrow 1.$$

Данный переход активизируется, когда в состоянии выполнения ФБ (*OSM*-состояние s_2) завершено выполнение всех *ЕС*-акций, прикрепленных к *ЕС*-состоянию ($NA = 0$). Действия, выполняемые одновременно при активизации данного перехода:

- 1) установка *OSM*-состояния s_1 ;
- 2) установка счетчиков *ЕС*-акций и шагов алгоритмов в единицу.

Переход «Завершение базисного ФБ» выражается следующим правилом:

$$\begin{aligned} & T_{CF} : Z_S(S) = s_1 \wedge AbsentsEnabledECTran \Rightarrow \\ & \Rightarrow Z_S(S) \leftarrow s_0; Z_\alpha(\alpha) \leftarrow false; Z_\beta(\beta) \leftarrow true; \quad \bigvee_{ei_k \in EI} Z_{EI}(ei_k) \leftarrow false. \end{aligned}$$

Данный переход активизируется, когда в *OSM*-состоянии s_1 нет разрешенных *ЕС*-переходов. Действия, выполняемые одновременно при активизации данного перехода:

- 1) переход базисного ФБ в состояние «Свободен»;
- 2) сброс всех входных событийных переменных;
- 3) сброс переменной запуска ФБ;
- 4) установка переменной окончания выполнения ФБ.

Как отмечалось выше, при циклической модели выполнения диспетчер запускает «свободный» базисный ФБ независимо от наличия на его входах сигналов и от его готовности или неготовности обработать эти входные сигналы. Поэтому в данном случае возможна ситуация так называемого «пустого» выполнения базисного ФБ, когда никаких действий базисным ФБ фактически не выполняется. Переход «Пустой запуск базисного ФБ» представляется следующим правилом:

$$T_{ES} : Z_{\alpha}(\alpha) \wedge Z_S(S) = s_0 \wedge \overline{ExistsInputEvent} \wedge Z_{\omega}(\omega) \Rightarrow \\ \Rightarrow Z_{\alpha}(\alpha) \leftarrow false; Z_{\beta}(\beta) \leftarrow true.$$

Данный переход активизируется, когда в «свободном» состоянии базисного ФБ приходит сигнал его запуска, но при этом на его событийных входах нет ни одного сигнала. Кроме того, должны быть завершены все передачи сигналов в объемлющей системе. Действия, выполняемые одновременно при активизации данного перехода:

- 1) сброс переменной запуска ФБ;
 - 2) установка переменной окончания выполнения ФБ.
- Определим множество событийных связей МСФБ:

$$EV \subseteq \left(EI \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} EO_i \right) \times \left(EO \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} EI_i \right).$$

Переходы типа «Передача сигналов на входы компонентных ФБ» (вернее, экземпляров ФБ, представляющих эти компонентные ФБ) описываются следующим множеством правил:

$$\left\{ T_{TC}[k, j] : Z_{\alpha}(\alpha) \wedge \left(\bigvee_{(ei_m, ei_k^j) \in EV} Z_{EI}(ei_m) \vee \bigvee_{(eo_n^x, ei_k^j) \in EV} Z_{EO_i}(eo_n^x) \right) \Rightarrow \right. \\ \Rightarrow Z_{EI_j}(ei_k^j) \leftarrow true; \quad \bigwedge_{(ei_m, ei_k^j) \in EV} Z_{EI}(ei_m) \leftarrow false; \\ \left. \bigwedge_{(eo_n^x, ei_k^j) \in EV} Z_{EO_i}(eo_n^x) \leftarrow false \mid ei_k^j \in \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} EI_i \right\}.$$

Переходы типа «Выдача сигналов составным ФБ (с выдачей выходных данных)» могут быть представлены следующим множеством правил:

$$\left\{ T_{TO}[k] : Z_{\alpha}(\alpha) \wedge \left(\bigvee_{(ei_m, eo_k) \in EV_G} Z_{EI}(ei_m) \vee \bigvee_{(eo_n^x, eo_k) \in EV_G} Z_{EO_i}(eo_n^x) \right) \Rightarrow \right. \\ \Rightarrow Z_{EI_j}(ei_k^j) \leftarrow true; \quad \bigwedge_{(ei_m, eo_k) \in EV_G} Z_{EI}(ei_m) \leftarrow false; \\ \bigwedge_{(eo_n^x, eo_k) \in EV_G} Z_{EO_i}(eo_n^x) \leftarrow false; \\ \left. \bigwedge_{(eo_k, vob_m) \in OW} Z_{VOB}(vob_m) \leftarrow Z_{VO}(repr_{VO}(vob_m)) \mid eo_k \in EO \right\}.$$

Существуют два подвида диспетчера для циклической модели: главный диспетчер и диспетчер промежуточного уровня. Для диспетчера промежу-

точного уровня переходы типа «Запуск компонентного ФБ» могут быть представлены следующими правилами:

$$T_{DS}^1 : Z_{\alpha}(\alpha) \Rightarrow Z_{\alpha_1}(\alpha_1) \leftarrow true$$

$$\left\{ T_{DS}^2[i] : Z_{\beta_i}(\beta_i) \wedge Z_{\omega}(\omega) \Rightarrow Z_{\alpha_{i+1}}(\alpha_{i+1}) \leftarrow true; Z_{\beta_i}(\beta_i) \leftarrow false \mid i = \overline{1, (N_{FB} - 1)} \right\}.$$

Первое правило предназначено для запуска первого компонентного ФБ, а второе – для запуска последующих ФБ.

Переход «Завершение выполнения составного ФБ» совершается тогда, когда закончил выполнение последний компонентный ФБ в составном ФБ. Правило для данного перехода следующее:

$$T_{DC} : Z_{\beta_{N_{FB}}}(\beta_{N_{FB}}) \wedge Z_{\omega}(\omega) \Rightarrow Z_{\beta}(\beta) \leftarrow true; Z_{\alpha}(\alpha) \leftarrow false.$$

5. Пример. Модель системы двух арифметико-логических устройств

В качестве примера системы ФБ рассмотрим систему двух арифметико-логических устройств (АЛУ) (рис. 1) [11]. Моделируемая система состоит из двух базисных ФБ, представляющих АЛУ, и является замкнутой.

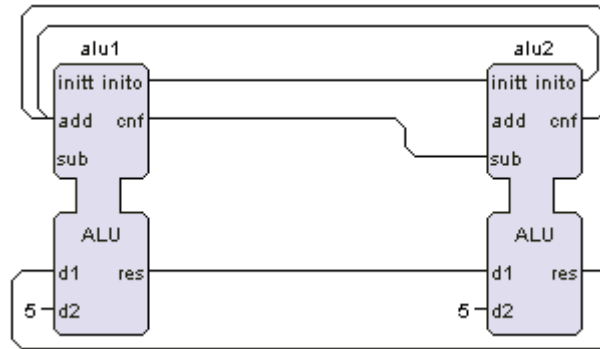


Рис. 1. Система двух АЛУ

Базисный ФБ *alu* (рис. 2) предназначен для выполнения арифметических действий – сложения и вычитания в зависимости от поступающего на его вход сигнала. Реализуемые в блоке *alu* алгоритмы: *алгоритм* ALG1: $n := 13$; $res := n - 10$; *алгоритм* ALG2: $res := d1 + d2 + n$; *алгоритм* ALG3: $res := d1 - d2 - n$; где n – внутренняя переменная, инициализируемая числом 13.

Ниже на языке *SMV* приведены примеры кодирования переходов системы, а также некоторых условий, облегчающих построение модели:

1) переход «Срабатывание *EC*-перехода $q0 \rightarrow q2$ в экземпляре ФБ *alu1*»:

$Q_alu1 = q0 \ \& \ S_alu1 = s1 \ \& \ TranCond_q0q2_alu1 \ \& \ !TranCond_q0q1_alu1$
 & – условие разрешенности перехода;
 $next(Q_alu1) = q2 \ \& \ next(S_alu1) = s2 \ \& \ next(add_alu1) = 0 \ \& \ next(NA_alu1) = 1 \ \& \ next(NI_alu1) = 1$ & – действия перехода;
 $next(init_alu1) = init_alu1 \ \& \ next(sub_alu1) = sub_alu1 \ \& \ u_var_alu1 \ \& \ u_EO_var_alu1 \ \& \ u_disp_var_alu1 \ \& \ u_obj_alu2$ – сохранение значений переменных;

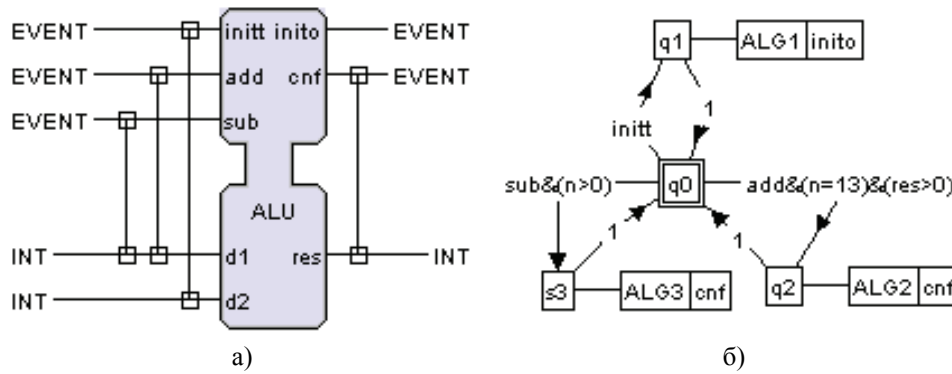


Рис. 2. Базисный ФБ ALU: интерфейс (а), диаграмма ECC (б)

2) переход «Выполнение шага 1 алгоритма в первой *EC*-акции *EC*-состояния *q2* в экземпляре ФБ *alu2*»:

$Q_alu2=q2 \ \& \ NA_alu2=1 \ \& \ NI_alu2=1 \ \& \ -$ условие разрешенности перехода;

$next(res_alu2)=(d1_alu2 + d2_alu2 + n_alu2) \ \& \ next(NI_alu2)=0 \ \& \ -$ действия перехода;

$next(n_alu2)=n_alu2 \ \& \ u_step_environment_alu2$ – сохранение значений переменных;

3) условие сохранения выходных событийных переменных ФБ *alu1*:

$DEFINE \ u_EO_var_alu1 := next(inito_alu1) = inito_alu1 \ \& \ next(cnf_alu1) = cnf_alu1;$

4) условие *EC*-перехода $q0 \rightarrow q2$ в экземпляре ФБ *alu1*:

$DEFINE \ TranCond_q0q2_alu1 := add_alu1 \ \& \ GuardCond_q0q2_alu1;$

5) сторожевое условие *EC*-перехода $q0 \rightarrow q2$ в экземпляре ФБ *alu1*:

$DEFINE \ GuardCond_q0q2_alu1 := (n_alu1=13) \ \& \ (res_alu1>0);$

Для анализа модели может использоваться временная логика *CTL* [1], реализованная в *SMV*. При этом с использованием временных операторов *AX*, *AF*, *AG*, *EX*, *EF*, *EG* и *U* могут быть заданы проверяемые свойства системы ФБ. Ниже приводятся примеры запросов:

1) запрос на достижимость: *SPEC EF (res1Buf = 18)* – «Может ли значение выходного буфера блока *alu1* принимать значение 18?» (Результат: *true*);

2) запрос на возможность: *SPEC AG(EF (alu1.Q=q2))* – «Повторяется ли *EC*-состояние *q2* блока *alu1* при функционировании бесконечно часто?» (Результат: *true*);

3) запрос типа «Возможный ответ»: *SPEC AG (alpha2 -> AF alpha1)* – «Всегда ли запуск первого блока неизбежно влечет за собой запуск второго блока?» (Результат: *true*).

Заключение

В данной работе предложена формальная модель переходов состояний приложений ИЕС 61499 и продемонстрировано ее использование при верификации конкретной системы ФБ. Из-за недостатка места формальная модель не была рассмотрена в полном объеме. Кроме того, не был рассмотрен второй подход к построению формальной модели, ориентированный на использование *SMV*-модулей, а также формальные модели систем ФБ, выполняемых

в рамках синхронной семантики и семантики на основе последовательной гипотезы. Направлением дальнейших исследований является программная реализация автоматического транслятора *XML*-представлений систем ФБ в код *SMV*.

Список литературы

1. **Кларк, Э.** Верификация моделей программ: Model Checking / Э. Кларк, О. Грамберг, Д. Пелед. – М. : МЦНМО, 2002. – 416 с.
2. International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture // International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005. – 111 p.
3. Cadence SMV. – URL: <http://www.kenmcml.com/smv.html>.
4. NuSMV – New Symbolic Model Checker. – URL: <http://nusmv.first.itc.it>.
5. **Yoo, J.** A Verification Framework for FBD Based Software in Nuclear Power Plants / J. Yoo, S. Cha, E. Jee // 15th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC '08). – Beijing, 2008. – P. 385–392.
6. **Vyatkin, V.** A modelling approach for verification of IEC1499 function blocks using Net Condition/Event Systems / V. Vyatkin, H.-M. Hanisch // IEEE conference on Emerging Technologies in Factory Automation (ETFA'99). – Barcelona, Spain, 1999. – P. 261–270.
7. **Дубинин, В. Н.** Анализ расширенных NCES-сетей на основе метода Model Checking / В. Н. Дубинин, Х.-М. Ханиш, В. В. Вяткин, С. К. Шестаков // Новые информационные технологии и системы : труды IX Международной научно-технической конференции (НИТиС'2010). – Пенза, 2010. – Ч. 2. – С. 20–48.
8. **Dubin, V.** On Definition of a Formal Semantic Model for IEC 61499 Function Blocks / V. Dubin, V. Vyatkin // EURASIP Journal on Embedded Systems. – 2008. – Vol. Article ID 426713. – P. 10.
9. **Vyatkin, V.** The IEC 61499 Standard and its Semantics / V. Vyatkin // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2009. – V. 3, Issue 4. – P. 40–48.
10. **Gurevich, Y.** Evolving Algebras 1993: Lipari Guide / Y. Gurevich // Specification and Validation Methods. – Oxford : Oxford University Press, 1995. – P. 9–36.
11. **Dubin, V.** Using Prolog for Modelling And Verification of IEC 61499 Function Blocks and Applications / V. Dubin, V. Vyatkin, H.-M. Hanisch // 11-th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2006), Proceedings. – Prague, Czech Republic, 2006. – P. 774–781.

Дубинин Виктор Николаевич

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

E-mail: victor_n_dubin@yaho.com

Dubin Viktor Nikolaevich

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

Вяткин Валерий Владимирович

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

E-mail: victor_n_dubin@yaho.com

Vyatkin Valery Vladimirovich

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

УДК 681.5 : 004.415.28

Дубинин, В. Н.

Верификация приложений ИЕС 61499 на основе метода Model Checking / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 44–55.

РАЗРАБОТКА МНОГОПОТОЧНОЙ МОДЕЛИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ АВИАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. Рассматриваются вопросы построения многопоточной модели программного обеспечения экспертной системы авиационных радиолокационных комплексов в части загрузки данных в систему объективного контроля авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения.

Ключевые слова: радиолокационный комплекс, модель, сеть Петри, экспертные системы.

Abstract. The article deals with the construction of multithreaded software model of the expert system of aircraft radar systems in terms of data loading into the system of objective monitoring of aircraft systems and targeting radar patrol.

Key words: radar system, model, Petri nets, expert systems.

Введение

Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН) для оценки качества выполнения полетных заданий и технического состояния радиотехнических комплексов (РТК) используют экспертные системы, которые осуществляют объективный контроль. Объем обрабатываемой информации в этих системах может достигать нескольких терабайт [1, 2].

Наиболее длительными и трудоемкими процессами при работе системы объективного контроля являются загрузка данных с бортового устройства регистрации в базу данных и автоматизированный контроль аппаратуры и выполнения полетного задания [3].

В статье [4] освещены ключевые моменты, которые следует учесть при построении экспертных систем параллельной обработки, а также теоретические аспекты построения таких систем.

В данной работе непосредственно рассматривается построение многопоточной модели программного обеспечения (ПО) экспертной системы авиационных радиолокационных комплексов, обеспечивающее загрузку данных в систему объективного контроля АК РЛДН.

1. Описание модели

Модель наземного комплекса обработки и дешифрирования информации (НКОД) представляет собой многоуровневую сеть Петри, верхний уровень которой представлен на рис. 1.

При построении модели многопоточной системы, какой является система НКОД, позиции вводятся парами: одна позиция хранит фишки-данные, а другая фишки-потoki. Для функционирования модели необходимо ввести две позиции *files* и *threads*, которые представляют собой входные файлы и потоки.

В начале функционирования сети происходит генерация потоков, которые в виде фишек попадают в позицию потоков.

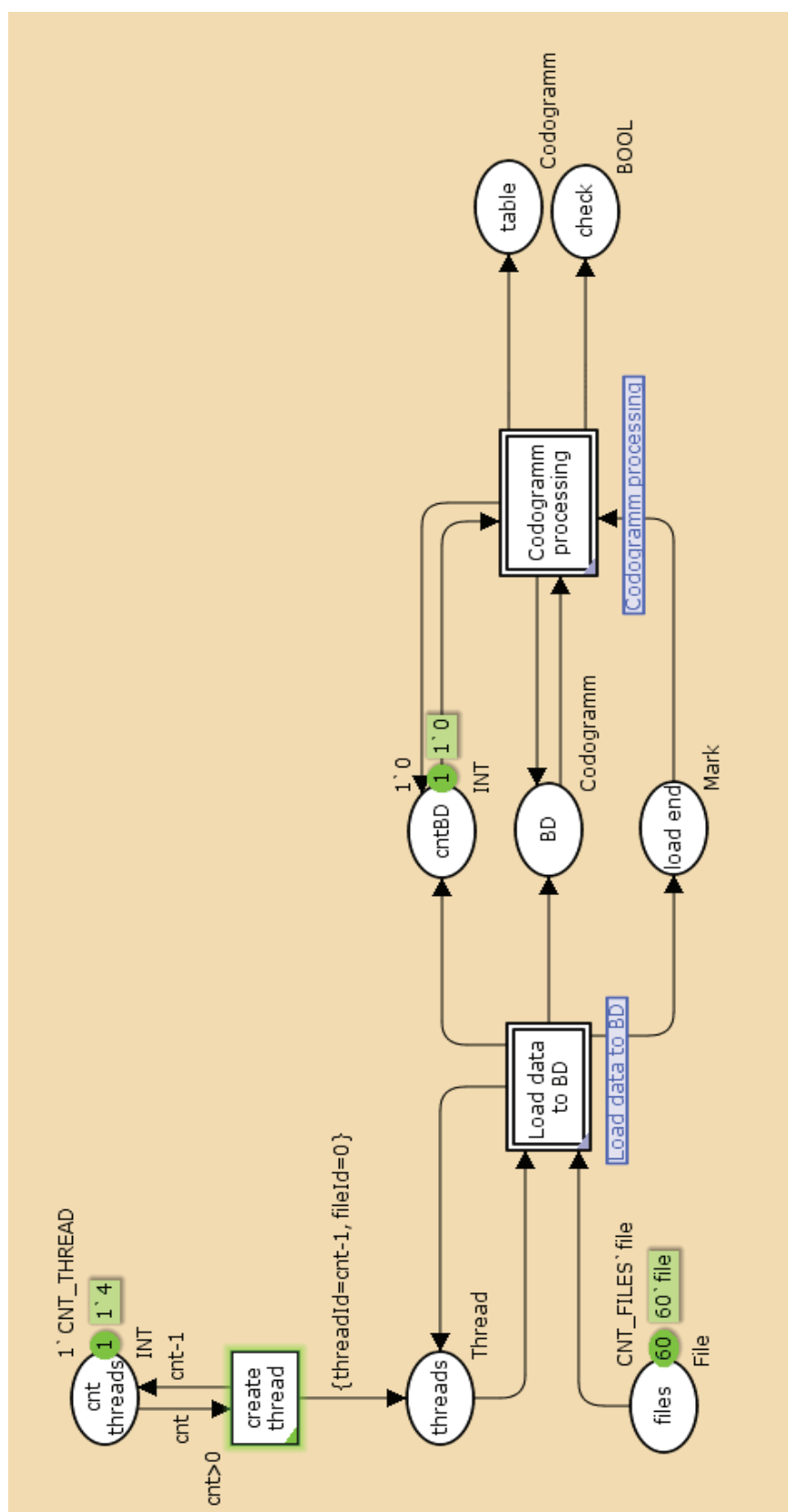


Рис. 1. Верхний уровень модели НКОД, реализованный в CPN tools

Фишки из позиций *files* и *threads* поступают в переход «Load data to BD», после моделирования которого происходит запуск перехода «Codogram processing». В процессе моделирования происходит сбор статистической информации в позиции *table* и *check*.

Далее рассмотрим подробнее переход «Load data to BD», моделирующий процедуру загрузки данных в систему.

2. Формализация процедуры загрузки данных в систему

Переход *Load data to BD* моделирует загрузку данных в систему объективного контроля и является переходом на следующий уровень модели НКОД, который представлен на рис. 2.

Из позиций *thread* и *files* фишки потоков и входных данных обрабатываются переходом *Read file size and header*, который имитирует процесс чтения размера файла.

Переход, отвечающий за чтение файла и заголовка, создает переменные, которые необходимы для обработки файла, и помещает их в позиции *file end*, *isSave header*, *save header*, *not read size* и *not read size _thread*.

Первая из перечисленных позиций хранит фишки типа *BOOL_T*, которые способны принимать значения «ложь» и «истина» и являются признаком окончания чтения файла, если фишка примет истинное значение. В эту позицию при загрузке очередного файла помещается фишка с ложным значением, которая символизирует, что процесс чтения файла не был окончен.

Следующая позиция также хранит фишки типа *BOOL_T*, которые в данном контексте являются признаком хранения заголовка кодограммы при обработке файла соответствующим потоком. Эта позиция при загрузке очередного файла заполняется ложным значением. Если заголовок будет сохранен соответствующим потоком, то соответствующая сохранившему заголовку потоку фишка в позиции «*isSave header*» примет значение «истина».

Третья позиция хранит фишки типа *HeaderCod_T*, этот тип хранит заголовки кодограммы (номер кодограммы и размер). Данная позиция используется совместно с предыдущей для хранения заголовков кодограммы, если возникает ситуация, когда при чтении тела кодограммы из буфера выясняется, что оно было записано не полностью и необходимо произвести очередную запись кодограммы из файла в буфер, заголовок которой уже был прочитан.

При этом заголовок кодограммы необходимо сохранить в позицию *save header*, прочитать новую порцию данных из файла и начать чтение из буфера не с заголовка кодограммы, а с ее тела, используя сохраненный заголовок.

Эта позиция при загрузке очередного файла заполняется фишкой, содержащей нулевые значения номера и размера кодограммы, т.е. создается переменная, ассоциированная с потоком, читающим файл, которая в будущем будет использована для хранения заголовка.

Следующая позиция хранит фишки типа *INT_T*, содержащие размер непрочитанной части файла. Эта позиция при загрузке очередного файла заполняется значением размера файла.

Пятая позиция хранит фишки типа *Thread*, содержащие потоки, связанные с позицией «*not read size*». Эта позиция заполняется текущим рабочим потоком.

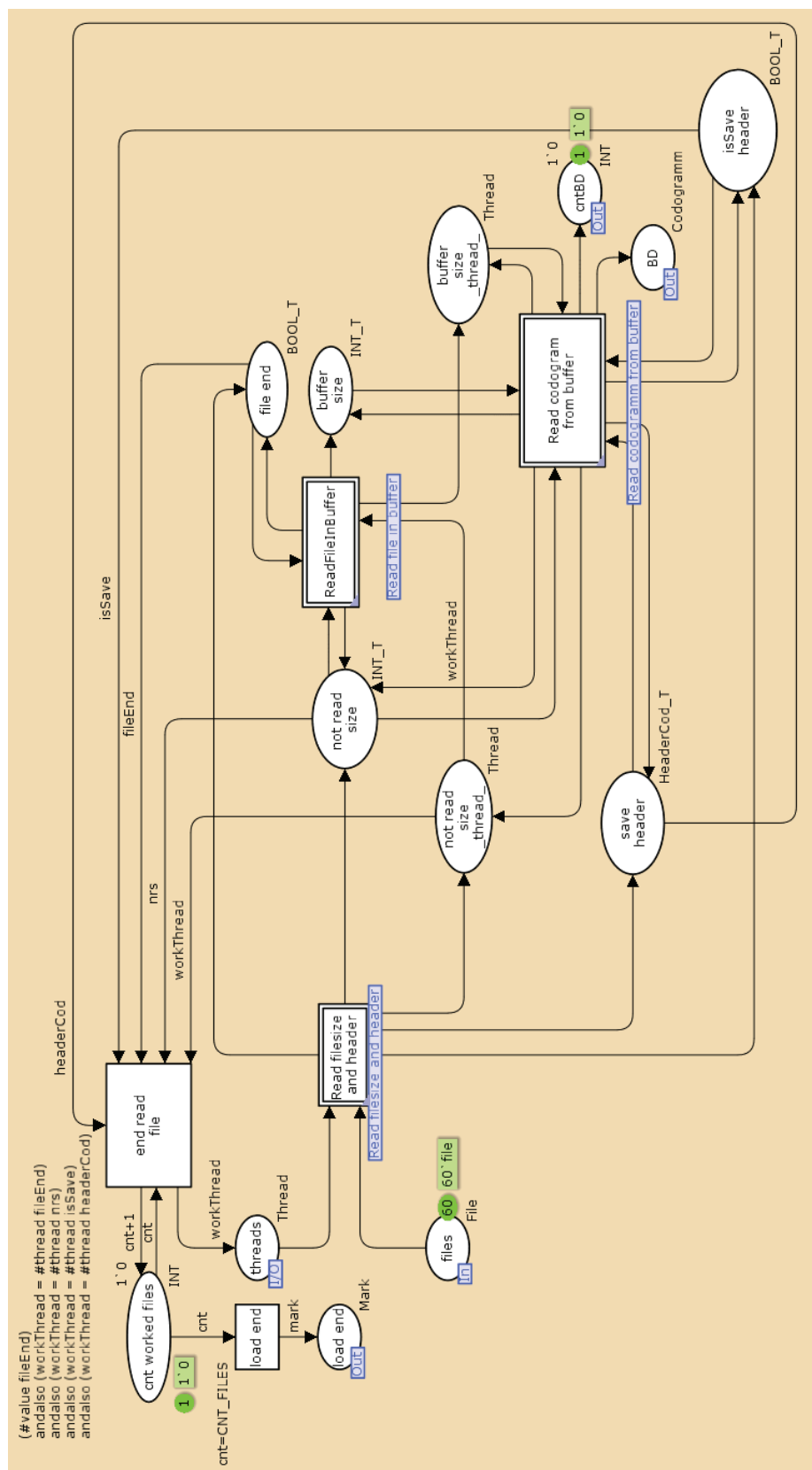


Рис. 2. Загрузка информации в базу данных

3. Формализация процедуры чтения данных из файла в буфер системы

Переход *Read file in buffer* (рис. 3) является переходом на следующий уровень модели и производит чтение из файла в буфер с учетом использования диска в качестве критического ресурса.

Переходы, моделирующие процесс чтения, содержатся в двух ветвях сети: одна ветвь служит для формализации чтения файла в буфер, когда размер оставшейся части файла больше размера буфера, а другая – когда меньше, т.е. вторая ветвь необходима для последнего чтения из файла и установки фишки-флага, указывающего на конец файла в позиции *file end* в истинное значение.

При срабатывании переходов *take hdd and read* или *last take hdd and read* происходит перемещение фишек из позиций *not read size*, *not read size _thread_* и *free hdd* в позиции *nrs*, *nrs _thread_* и *take hdd*, т.е. происходит захват критического ресурса, который в данном случае является жестким диском.

Таким образом, реализуется принцип программного управления системой доступа к критическому ресурсу.

Позиции *take hdd* и *free hdd* отображают состояние занятости критического ресурса. Первая хранит фишки типа *Mark*. Присутствие фишки в данной позиции означает занятость критического ресурса. Вторая позиция хранит фишки такого же типа. Если фишка присутствует в данной позиции, то позиция свободна.

Переходы *free HDD* и *last free HDD* отвечают за освобождение критического ресурса и организацию конвейера взаимодействия.

Первый переход осуществляет чтение из файла в буфер обмена и освобождение критического ресурса, когда размер оставшейся части файла больше размера буфера.

Второй переход осуществляет чтение из файла в буфер обмена и освобождение критического ресурса, когда размер оставшейся части файла меньше или равен размеру буфера.

При срабатывании первого перехода в позицию *not read size* объем непрочитанных данных из файла уменьшается на величину буфера. Если же срабатывает второй переход, то он сигнализирует о том, что буфер пуст. Кроме того, при срабатывании любого из переходов происходит освобождение критического ресурса и передача фишки, содержащей объем прочитанных данных, в позицию *buffer size*, а также передача рабочего потока в позицию *buffer size _thread_*.

4. Формализация процедуры чтения кодограмм из буфера системы

Выходные данные перехода *Read file in buffer*, который производит чтение из файла в буфер, являются входными для перехода *Read codogram from buffer*, осуществляющего процесс чтения кодограмм из буфера. Это переход на следующий уровень модели, который обрабатывает процесс чтения кодограмм из буфера в базу данных (рис. 4).

Переход *read codogram header* моделирует процедуру получения заголовка кодограммы из буфера. При этом значение фишки, поступающей на вход перехода, уменьшается на величину, равную длине заголовка кодограммы, и помещается в позицию *buffer size*. Прочитанный заголовок кодограммы помещается в виде фишки в позицию *codogram header*, а рабочий поток из позиции *buffer size _thread_* – в позицию *codogram header _thread_*.

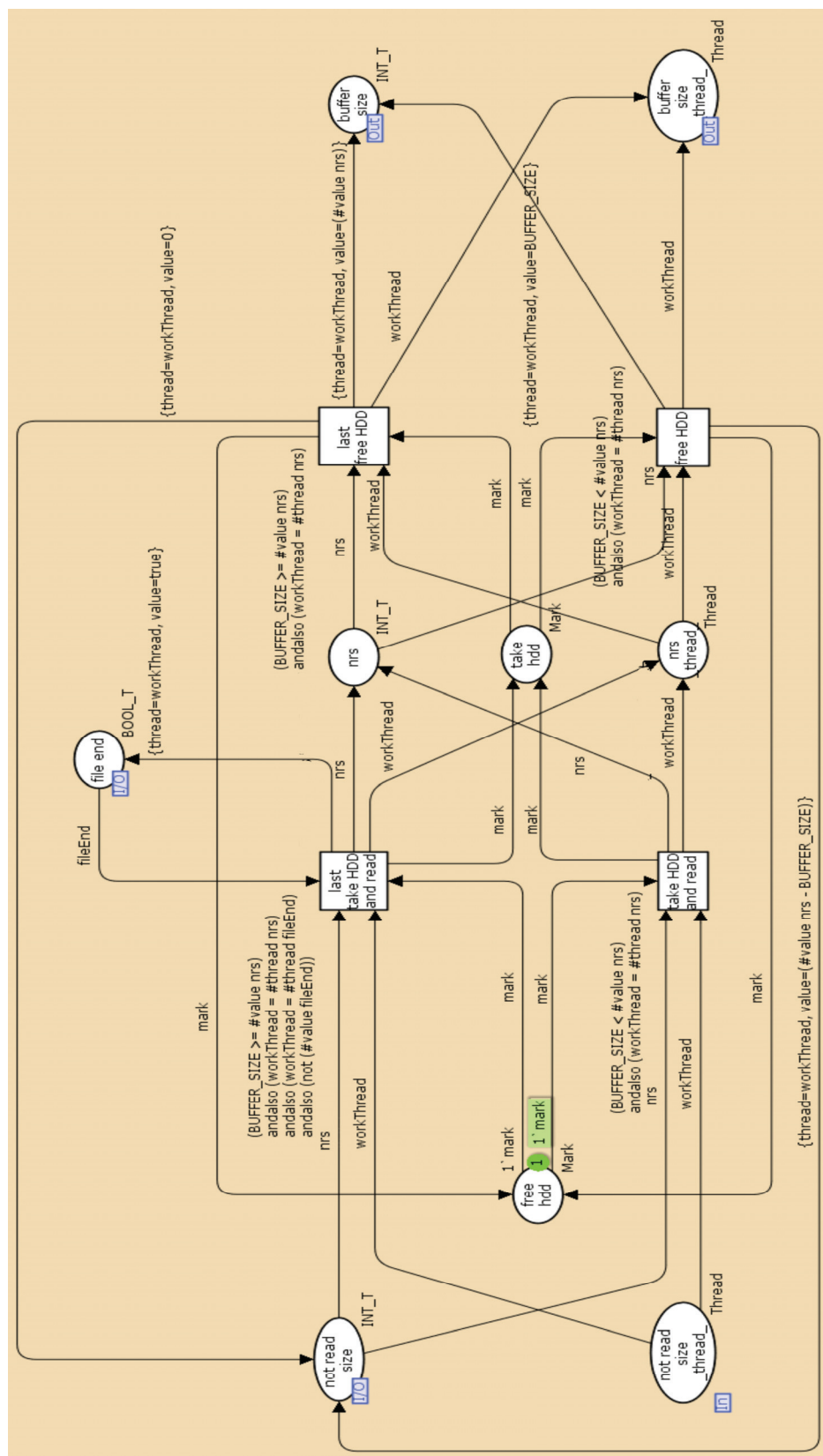


Рис. 3. Моделирование чтения данных из файла в буфер

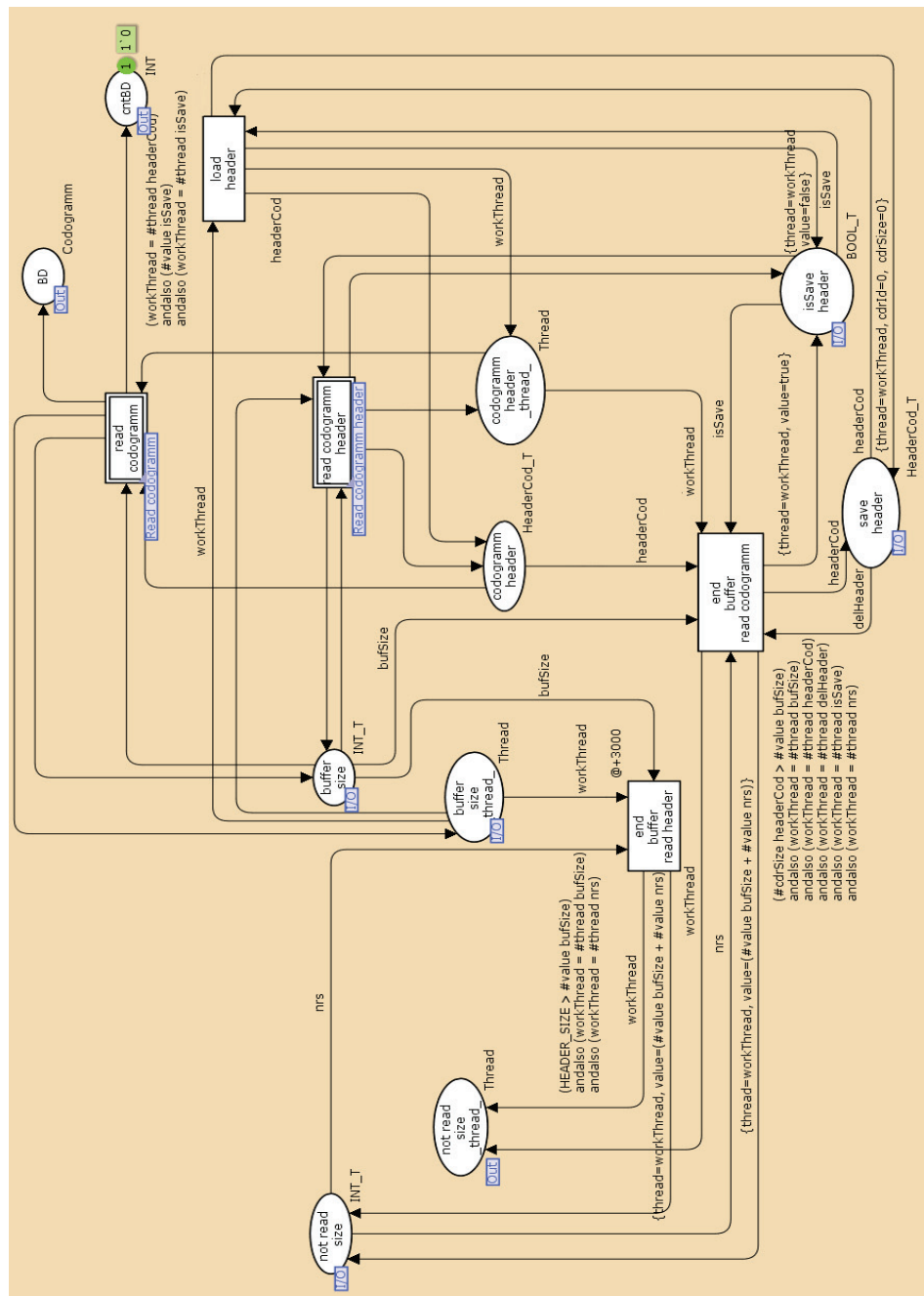


Рис 4. Третий уровень модели НКЮД (Read codogramm from buffer)

Этот переход срабатывает, если ранее не был сохранен заголовок кодограммы, т.е. если флаг в позиции *isSave header* сохранения заголовка кодограммы для данного рабочего потока ложный.

Переход *load header* срабатывает, если заголовок кодограммы был прочитан ранее. Он производит перенос фишки, содержащей сохраненный заголовок кодограммы, в позицию *codogram header*, при этом в позиции *isSave header* соответствующая фишка-флаг сбрасывается.

После того как заголовок кодограммы был помещен в позицию *codogram header* и соответственно был получен размер тела кодограммы, можно ее прочитать. Переход *read codogram* производит чтение тела кодограммы. Ему на вход поступают фишки, содержащие заголовок кодограммы, размер буфера и рабочий поток; в результате его срабатывания происходит чтение кодограммы в базе данных, а на выходе формируется фишка, содержащая размер оставшихся данных в буфере и фишка – рабочий поток, которые помещаются в позиции *buffer size* и *buffer size _thread_* соответственно.

Переходы *end buffer read header* и *end buffer read codogram* отслеживают окончание данных в буфере.

Переход *end buffer read header* срабатывает, если при попытке прочитать очередной заголовок кодограммы выяснилось, что объем данных в буфере меньше длины заголовка кодограммы. При этом происходит добавление длины оставшихся данных в буфере *buffer size* к длине непрочитанных данных, хранящихся в фишке в позиции *not read size*, и помещение результирующей фишки в позицию *not read size*. Кроме того, рабочий поток перемещается из позиции *buffer size _thread_* в позицию *not read size _thread_*. На этом работа вложенного перехода чтения данных из файла в буфер завершается.

Переход *end buffer read codogram* срабатывает, если при попытке прочитать очередное тело кодограммы выяснилось, что объем данных в буфере меньше длины тела кодограммы. При этом происходит добавление длины оставшихся в буфере *buffer size* данных к длине непрочитанных данных, хранящихся в фишке в позиции *not read size*, и помещение результирующей фишки в позицию *not read size*. Так же происходит сохранение заголовка кодограммы путем помещения фишки – заголовка кодограммы из позиции *codogram header* в позицию *save header* и установления флага в позиции *isSave header*. Кроме того, рабочий поток перемещается из позиции *buffer size _thread_* в позицию *not read size _thread_*.

Переход *end read file* срабатывает, когда флаг окончания файла, хранимый в позиции *file end*, принимает истинное значение. При этом фишки из позиций *not read size*, *save header* и *isSave header*, поступая на вход перехода, уничтожаются, а фишка потока из позиции *not read size _thread_* помещается в позицию *threads*. Таким образом, поток становится доступным для чтения следующего файла из позиции *files*. Работа перехода *Load data to BD* завершается, если в позиции *files* не остается файлов, а в позицию *threads* возвращаются все потоки, т.е. если файлов, ожидающих обработки, не осталось и все потоки завершили свою работу.

Заключение

Разработанная многопоточная модель ПО экспертной системы авиационных радиолокационных комплексов позволяет моделировать работу параллельных потоков, освобождение и занятие критических ресурсов системы.

Недостатком этой модели является то, что процессы, представленные в ней, не обладают временными задержками, так как моделируется алгоритмическая часть, в то время как временные задержки относятся к аппаратной части. В настоящее время ведется разработка модели аппаратной части экспертной системы авиационных радиолокационных комплексов, в которой будут учтены временные задержки и архитектура физических устройств.

Список литературы

1. **Волчихин, В. И.** Экспертная система контроля и документирования в авиации / В. И. Волчихин, Д. В. Пащенко, А. Н. Токарев, Н. Н. Коннов // Автоматизация и управление в технических системах : межвузовский сборник научных трудов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2008. – С. 170–175.
2. **Коннов, Н. Н.** Система для расшифровки и анализа данных объективного контроля радиолокационного комплекса / Н. Н. Коннов, Д. В. Пащенко, Г. М. Морозов, А. В. Васильев // Новые информационные технологии и системы : труды 8 Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2008. – С. 274–281.
3. Приказ министра обороны РФ от 24.09.2004 № 275 об утверждении федеральных авиационных правил производства полетов государственной авиации (зарегистрировано в Минюсте РФ 10.11.2004 № 6110) // Законодательство РФ 2004 года (часть 1). – URL: <http://2004-1.xof.ru/lib/?tm=151&vp=akt15155> (Дата обращения 23.09.2010).
4. **Пащенко, Д. В.** Проблемы построения многопоточной модели программного обеспечения экспертной системы авиационных радиолокационных комплексов / Д. В. Пащенко, Д. А. Трокоз // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 2 (18). – С. 21–29.

Пащенко Дмитрий Владимирович

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

E-mail: Dmitry.pashchenko@gmail.com

Pashchenko Dmitry Vladimirovich

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

Трокоз Дмитрий Анатольевич

магистрант, Пензенский
государственный университет

E-mail: vt@pnzgu.ru

Trokoz Dmitry Anatolyevich

Graduate student,
Penza State University

УДК 007.51

Пащенко, Д. В.

Разработка многопоточной модели программного обеспечения экспертной системы авиационных радиолокационных комплексов / Д. В. Пащенко, Д. А. Трокоз // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 56–64.

Н. Г. Федотов, А. Г. Петренко, А. В. Рой, Н. С. Фионов

ПОИСК ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ЛИЦА ПО ФОТОРОБОТУ В БОЛЬШОЙ БАЗЕ ДАННЫХ

Аннотация. Предложен подход к решению задачи поиска человеческих лиц в базе данных на основе стохастической геометрии и функционального анализа. Ключевым элементом этого подхода является применение нового класса конструктивных признаков распознавания – триплетных признаков. Рассмотрены этапы поиска изображений в базе данных, вытекающие из анализа физиологических принципов восприятия и распознавания совместно с теорией триплетных признаков.

Ключевые слова: распознавание лиц, база данных изображений, биометрический поиск, трейс-преобразование, стохастическая геометрия, триплетный признак.

Abstract. The authors present a new approach based on stochastic geometry and functional analysis to solve the problems of human face image retrieval from a database. A key element of this approach is the use of a new class of constructive features of recognition called triple features. An analysis of physiological principles of perception and recognition in conjunction with the theory of triple features determines a retrieval algorithm described in this paper.

Key words: face recognition, image database, biometric search, trace transform, stochastic geometry, triple feature.

Введение

Статья посвящена поиску изображений человеческих лиц в базе данных по эскизу или фотороботу. В данной работе предлагается подход к решению задачи поиска человеческих лиц на основе стохастической геометрии и функционального анализа. Ключевым элементом этого подхода является новое геометрическое трейс-преобразование изображений, введенное одним из авторов в [1]. Трейс-преобразование связано со сканированием изображений по сложным траекториям. Оно является ключевым элементом формирования конструктивных признаков распознавания нового класса – триплетных признаков, характерной особенностью которых является их структура в виде композиции трех функционалов [2]. Благодаря такой структуре возможно формирование большого числа (тысяч) признаков, причем в режиме автоматической компьютерной генерации. Опора на большое количество признаков ведет к повышению гибкости и надежности поиска.

Согласно психофизической теории восприятия и распознавания при восприятии изображения человеческого лица перемещение глаза носит стохастический характер с фиксацией на областях наибольшей информативности, в качестве которых выступают анатомические особенности лица. Детальная обработка не всего изображения, а преимущественно наиболее информативных областей, существенно увеличивает надежность поиска в базе данных, поскольку при этом реализуется принцип постепенного исключения избыточности.

1. Физиологические основы восприятия и распознавания человеческого лица

В 1930-е гг. на основе изучения зрительного аппарата человека и животных было установлено, что регулярный обзор пространства в природе не

осуществляется, и траектория движения глаз при осмотре объекта носит случайный характер.

Впоследствии экспериментальные исследования А. Л. Ярбуса по изучению механизмов выбора точек фиксации взгляда показали, что человек в процессе осмотра изображений фиксирует взгляд главным образом на наиболее информативных областях.

Выбор таких областей изображений для фиксации взгляда и детального анализа с помощью механизмов фовеального зрения зависит от множества факторов, взаимодействующих между собой.

Комплексный подход к изучению механизмов осмотра изображений, основанный на взаимодействии психофизического эксперимента и математического моделирования, описан в работе [3] научной школы НИИ нейрокibernетики им. А. Б. Когана Южного федерального университета. Наиболее информативные области, выделенные по результатам экспериментов с использованием современной системы регистрации и анализа движений глаз, оказались во многом сходны с результатами А. Л. Ярбуса.

Детальная обработка наиболее информативных областей (области глаз, носа, рта, контура лица) может значительно снизить вычислительные затраты, а удачное признаковое описание таких областей увеличит эффективность поиска и идентификации [4].

Специфика восприятия изображений лиц зрительным анализатором человека состоит также в том, что в процессе узнавания мозг выступает как активная распознающая система (с проверкой правильности решений). Этапами распознавания при этом могут быть: выделение признаков, предварительный анализ, выдвижение гипотезы, проверка гипотезы – сличение изображений с эталоном, взятым из памяти. В связи с этим принцип активного распознавания должен закладываться на этапе проектирования систем компьютерного видения изображений человеческих лиц [5].

2. Триpletные признаки

Для описания каждого портретного изображения строится набор переменных – множество tripletных признаков.

Пусть $F(x, y)$ – функция изображения на плоскости (x, y) . Определим на плоскости сканирующую прямую $l(\varphi, \rho, t)$, которая задается нормальными координатами φ и ρ :

$$x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi = \rho,$$

параметр t задает точку на прямой. Определим функцию двух аргументов $g(\varphi, \rho) = T(F \cap l(\varphi, \rho, t))$ как результат действия функционала T при фиксированных значениях переменных φ и ρ .

При проектировании распознающих систем используют дискретный вариант трейс-преобразования. Параметры сканирующей прямой образуют два дискретных множества $\Omega = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$, $\Gamma = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m\}$.

В результате действия функционала T получаем матрицу, элементами которой являются значения $t_{ij} = T(F \cap l(\varphi_j, \rho_i, t))$. Детерминированное сканирование позволяет однозначно определить каждый элемент матрицы. Дан-

ная матрица называется трейс-матрицей. Она является результатом трейс-преобразования, или трейс-трансформантой.

В дискретном варианте вычислений трейс-трансформанта представляет собой матрицу, элементами которой t_{ij} являются, например, значения яркости изображения F при пересечении со сканирующей линией $l(\varphi, \rho)$. Параметры сканирующей линии φ_j , ρ_i определяют позицию этого элемента в матрице. Последующее вычисление признака заключается в последовательной обработке столбцов матрицы с помощью функционала P , который называется диаметральным функционалом.

К полученному после применения P -функционала набору чисел, представляющему собой 2π -периодическую кривую, нужно применить круговой функционал Φ , чтобы получить число-признак.

Таким образом, триплетный признак вычисляется как последовательная композиция трех функционалов: $\Pi(F) = \Phi \circ P \circ T(F \cap L(\varphi, \rho, t))$, где каждый функционал (Φ , P и T) действует на функции одной переменной (φ , ρ и t) соответственно.

Варьируя свойства функционалов, входящих в триплетный признак, можно получить признаки с заданными свойствами. В частности, при определенном выборе функционалов можно получить признаки, инвариантные по отношению к группе движений и линейных деформаций распознаваемых изображений. Это повышает надежность поиска изображений в базе данных, так как система идентификации должна устойчиво функционировать в условиях линейных преобразований изображения и ограниченных ракурсных трансформаций объекта идентификации.

Кроме того, благодаря источнику триплетных признаков – трейс-преобразованию – в этих признаках отражаются свойства окрестностей точек пересечения сканирующей линией, что также говорит о перспективности выбора триплетных признаков для задачи поиска в базе данных изображений.

Таким образом, анализ физиологических принципов восприятия и распознавания совместно с теорией триплетных признаков приводит к идее поиска изображений в базе данных в несколько этапов, одним из которых является обучение. В данной работе поиск в базе данных изображений лиц производится по фотороботу, представленному в виде бинарного изображения.

3. Предварительная обработка изображений

Поскольку черно-белое изображение фоторобота сравнивается с изображением лиц из базы данных, необходима предварительная обработка изображений с целью приведения их к бинарному виду. Исходные цветные фотографические портреты приводятся специальной процедурой к полутоновым изображениям. Затем полутоновое изображение преобразуется в монохроматическое путем нелинейной пороговой фильтрации.

На этапе сегментации происходит выделение (разбиение изображения) наиболее информативных областей: глаза, нос, рот, овал лица и др. (рис. 1). В данном случае применен оригинальный метод, основанный на рекурсивной функции заливки заданным цветом произвольной замкнутой области изображения.

При сегментации портретного изображения с учетом физиологии человеческого лица происходит анализ окрестности заданных координат. Если пиксель в окрестности не является фоном, то координаты стартовой точки меняются и процедура вызывает себя с новыми измененными координатами. Это будет происходить до тех пор, пока не будут зафиксирована вся замкнутая область.

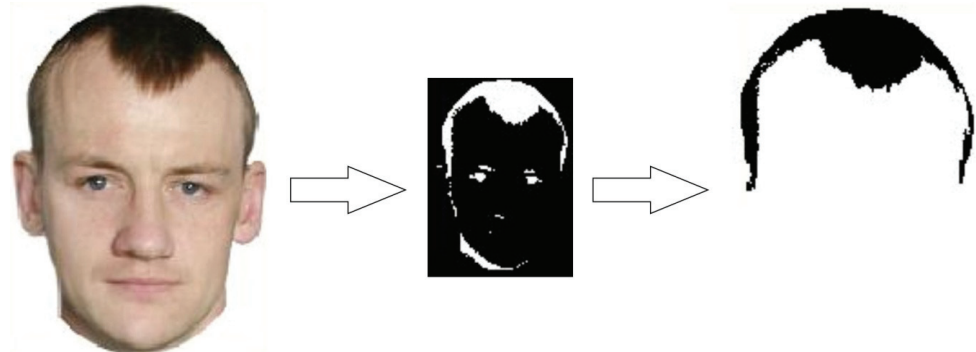


Рис. 1. Сегментация изображения из базы данных: выделение высоты лба

4. Этап обучения

В режиме обучения путем генерации триплетных признаков каждого портретного изображения, хранящегося в базе данных, строится набор поисковых триплетных признаков. Вычисления осуществляются по всем областям наибольшей информативности. Признаки, значения которых попадают в непересекающиеся или частично пересекающиеся интервалы обучающей совокупности, отбираются для поиска. Остальные, малоинформативные признаки, исключаются из рассмотрения, их влияние при принятии решения невелико.

Этапы вычисления триплетного признака схематично показаны на рис. 2.

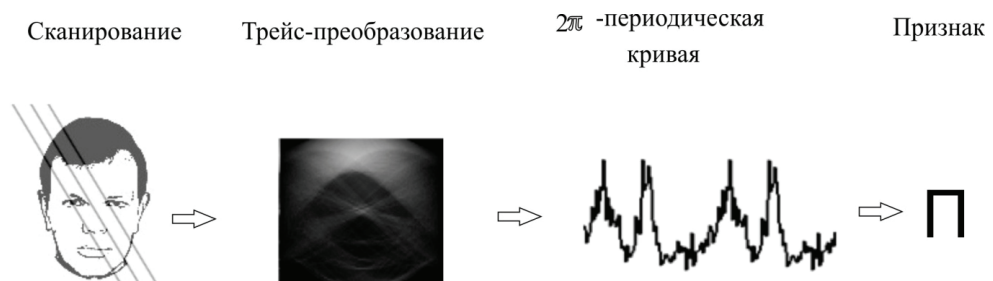


Рис. 2. Вычисление триплетного признака

Иногда для распознавания изображения достаточно только лишь одного трейс-преобразования, осуществляемого с помощью Т-функционалов. Однако при распознавании человеческих лиц в большинстве случаев одного трейс-преобразования недостаточно. Поэтому для всех изображений лиц целесообразно производить структурный анализ биометрических элементов портретного изображения (расположение глаз, носа, овала лица, определение контуров подбородка, усов). И уже для каждого элемента в отдельности выполнять процесс сканирования и вычисления триплетных признаков.

Например, важным этапом анализа человеческих лиц является различение лиц в зависимости от величины открытых глазных щелей.

На рис. 3 приведены примеры такой классификации, а также соответствующие трейс-преобразования, полученные с помощью наиболее различающихся функционалов.

Из рис. 3 видна чувствительность различных Т-функционалов и соответствующих трейс-матриц к сегментированной области глаз. Однако согласно алгоритму распознавания решающим критерием при распознавании изображений является триплетный признак. Т-функционал, формирующий трейс-преобразование, является лишь фрагментом триплетного признака. Дальнейшая свертка информации осуществляется путем постолбцовой обработки трейс-матрицы с помощью диаметального функционала. Итогом будет 2π -периодическая кривая. Изучая ее поведение, можно продолжить отбирать самые информативные поисковые признаки, а также оценить влияние Р-функционалов на всю процедуру распознавания, используемую при поиске изображений в базе данных.

После обработки 2π -периодической кривой круговым функционалом получаем триплетный признак изображения.

Видимая на глаз чувствительность Т-функционалов лишь облегчает работу по формированию набора информативных признаков в процессе обучения. На практике, даже если между трейс-трансформантами нет заметных различий для разных исходных изображений, различия между этими изображениями все же можно выявить, если заранее знать, что геометрически они существуют. Чтобы достичь этой цели, необходимо целенаправленное формирование триплетных признаков для самой главной области наибольшей информативности.

Например, для глаз может быть характерна либо вытянутость по горизонтали, либо круглая форма. Следовательно, нужно сформировать триплетные признаки, оценивающие различие форм: эллипсовидной и круглой. При округлой форме число нулевых элементов в каждом из столбцов трейс-матрицы будет примерно одинаково. Это происходит потому, что значение длин отрезков, высекаемых на различных сканирующих прямых, примерно одинаково. Для вычисляемого объекта наибольшее число ненулевых элементов расположено в том столбце, который соответствует направлению сканирования, совпадающему с направлением вытянутости.

5. Оценка информативности признаков пространства

Для оценки информативности пространства признаков используется подход, основу которого составляет гипотеза компактности [6]. Из нее следует, что для хорошего распознавания образов желательно, чтобы расстояния между своими точками каждого образа были малыми, а расстояния до точек других образов по возможности большими.

На рис. 4 приведены 3 исходных портретных изображения, предварительная обработка, сегментация и результаты вычислений триплетных признаков. Для данного примера в качестве трейс-преобразования T_1 было выбрано число сегментов, получаемых при пересечении прямой и образа. Также были взяты один диаметальный функционал P_1 – сумма всех элементов p -го столбца трейс-матрицы; и три круговых функционала: Φ_1 – площадь, образующаяся функцией на отрезке $[0; 2\pi]$, Φ_2 – среднее значение и Φ_3 – дисперсия функции.

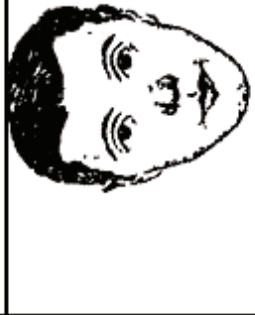
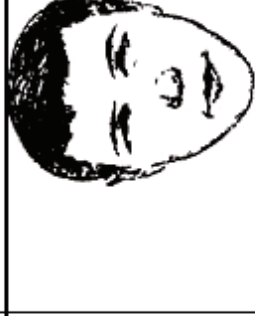
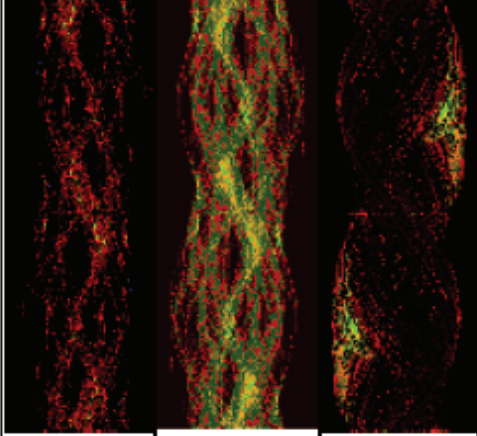
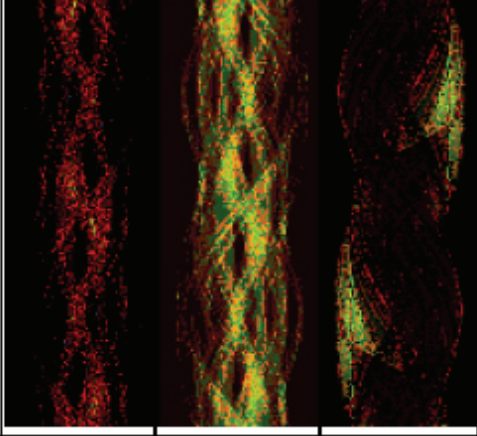
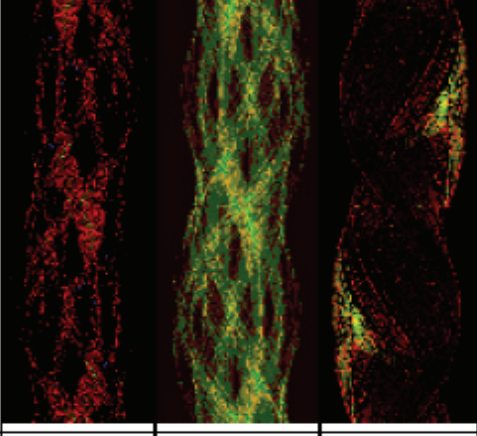
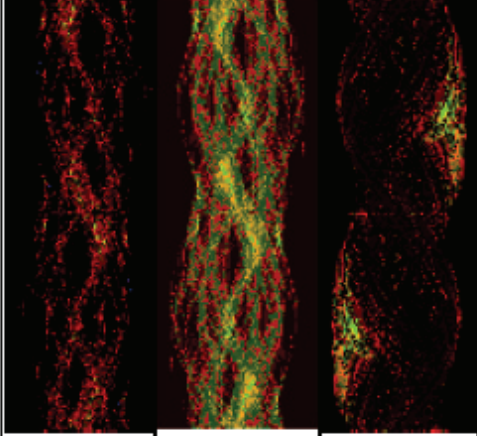
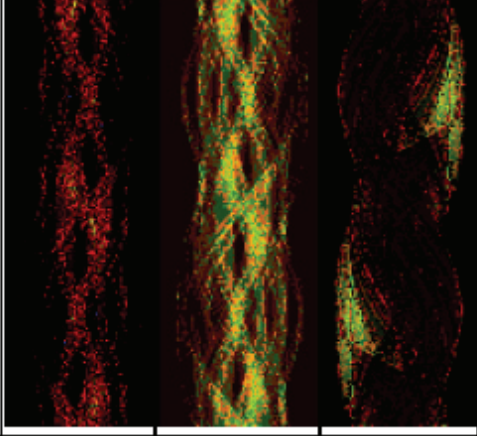
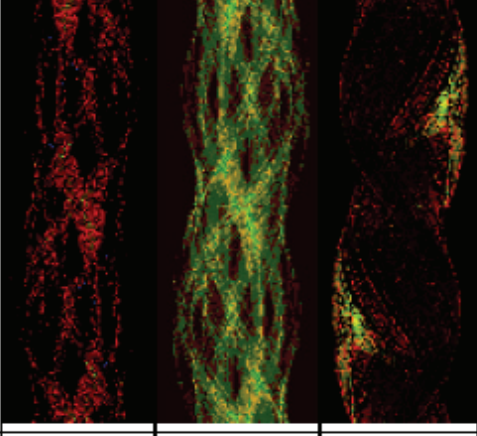
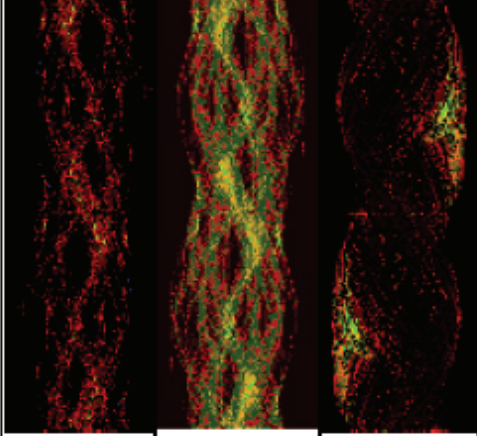
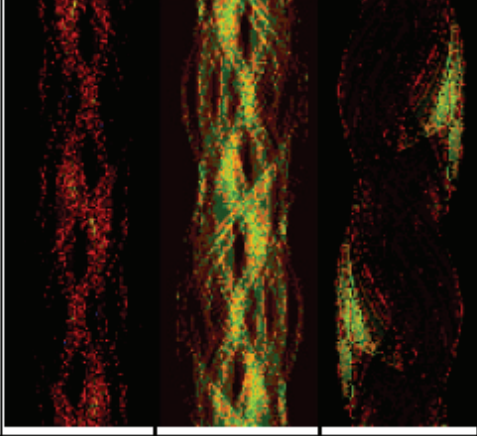
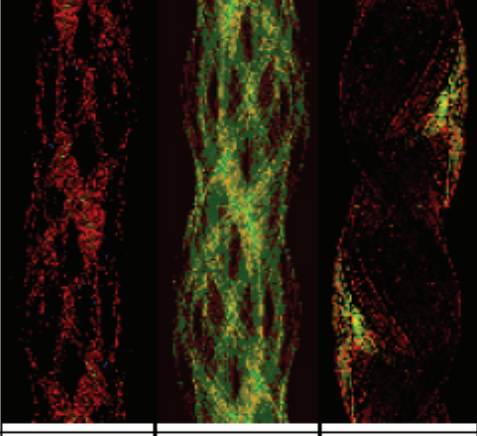
Величина открытых глазных щелей			
	Средняя	Большая	Малая
Т-функционал			
Длина высекаемых отрезков			
Число пересечений сканирующей линии с фигурой			
Максимальная длина высекаемых отрезков			

Рис. 3. Сравнение изображений лиц с разными величинами открытыми глазами по результатам применения Т-функционалов

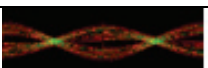
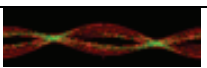
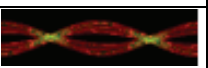
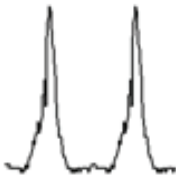
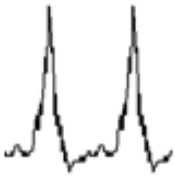
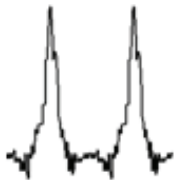
Исходный вид изображений				$\Pi_{cp.}$
Приведение к бинарному виду				
Пример сегментации (область глаз в качестве области наибольшей информативности)				
T_1				
$T_1 \circ P_1$				
$\Pi_{111} = T_1 \circ P_1 \circ \Phi_1$	3568	2738	3194	3203,2
$\Pi_{112} = T_1 \circ P_1 \circ \Phi_2$	1,0295	1,0280	1,0889	1,04084
$\Pi_{113} = T_1 \circ P_1 \circ \Phi_3$	161,70	83,94	131,61	126,618

Рис. 4. Результаты вычислений триплетных признаков

Для полученных триплетных признаков необходимо выбрать весовые коэффициенты. Это может сделать или оператор в режиме обучения, или программа в соответствии с гипотезой компактности. Для последнего случая, если за значения признака принять расстояние между точками сопоставляемых образов, необходимо сначала определить величину разнесенности образов средним расстоянием между точками образа.

Информативность признака вычисляется как отношение разнесенности каждого признака к их средней величине. Для данного набора изображений самым информативным из трех является признак Π_{111} . Полученные оценки информативности используются при сравнении изображений фоторобота с изображениями из базы данных.

6. Этап поиска

Процесс поиска в базе данных основан на том, чтобы предложить эксперту для рассмотрения в первую очередь те портретные изображения, которые имеют наибольшую степень близости к задаваемому фотороботу. Таким образом, происходит упорядочение всех изображений по выбранному критерию близости к объекту поиска – наименьшему расстоянию между сравнива-

емыми наборами поисковых признаков. Используя значения критерия R с учетом оценок информативности, программа упорядочит изображения по степени близости к выбранному фотороботу следующим образом:

Фоторобот	Изображение	Критерий $R_{i,j}$ %
		0,03255
		0,02603
		0,02066

Рис. 5. Результат применения решающего правила

В итоге мы получаем список, в начало которого попадают самые похожие на фоторобот изображения. Результаты поиска для 200 фотороботов и 1500 изображений из базы данных таковы: в 70 % случаев на первое место списка ставится изображение, соответствующее фотороботу; в 95 % случаев изображение, сопоставляемое фотороботу, попадает в первую двадцатку списка.

Заключение

Для поиска изображений в базе данных использован математический аппарат стохастической геометрии, что позволило достигнуть высоких показателей эффективности: гибкости, универсальности, надежности поиска, большего быстродействия.

При определенном выборе свойств функционалов, входящих в триплетный признак, можно добиться инвариантности поисковых признаков по отношению к группе движений и линейным искажениям изображений.

Для повышения надежности поиска изображений предложено определение триплетных признаков по областям изображений, соответствующим элементам человеческого лица. С этой целью разработана процедура сегментации. Алгоритм поиска на основе стохастической геометрии включает предварительную обработку изображения, его сегментацию, формирование геометрических трейс-преобразований изображений и вычисление по ним триплетных признаков, решающую процедуру.

Список литературы

1. **Федотов, Н. Г.** Методы стохастической геометрии в распознавании образов / Н. Г. Федотов. – М. : Радио и связь, 1990. – 143 с.
2. **Федотов, Н. Г.** Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа / Н. Г. Федотов. – М. : Физматлит, 2009. – 304 с.
3. **Подладчикова, Л. Н.** Комплексный подход к исследованию механизмов осмотра изображений / Л. Н. Подладчикова и др. // Нейроинформатика–2009 : сборник научных трудов 11-й Всероссийской научно-технической конференции. – М. : МИФИ, 2009. – Т. 1. – С. 249–257.
4. **Шапошников, Д. Г.** Оценка параметров информативных областей изображений лиц / Д. Г. Шапошников и др. // Материалы Международной конференции по нейрокибернетике. – Ростов-на-Дону, 2002. – С. 163–166.
5. **Глазунов, А. С.** Компьютерное распознавание человеческих лиц / А. С. Глазунов // Открытые системы. – 2000. – № 3. – URL: <http://www.osp.ru/os/2000/03/>.
6. **Загоруйко, Н. Г.** Прикладные методы анализа данных и знаний / Н. Г. Загоруйко. – Новосибирск : Изд-во Инст. математики, 1999. – 270 с.

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

Петренко Александр Григорьевич

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

E-mail: alxndrpetrenko@mail.ru

Petrenko Alexander Grigoryevich

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

Рой Алексей Владимирович

кандидат технических наук, старший
преподаватель, кафедра экономической
кибернетики, Московский
государственный агроинженерный
университет им. В. П. Горячкина

E-mail: ec@pnzgu.ru

Roy Aleksey Vladimirovich

Candidate of engineering sciences,
senior lecturer, sub-department of economic
cybernetics, Moscow State Agroengineering
University named after V. P. Goryachkin

Фионов Никита Сергеевич

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: finik86@rambler.ru

Fionov Nikita Sergeevich

Postgraduate student,
Penza State University

УДК 004.931:004.932

Федотов, Н. Г.

Поиск изображения человеческого лица по фотороботу в большой базе данных / Н. Г. Федотов, А. Г. Петренко, А. В. Рой, Н. С. Фионов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 65–74.

И. В. Потапов, В. А. Романенко

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСФЕРНЫМИ АВИАПЕРЕВОЗКАМИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Аннотация. Рассмотрено решение комплекса задач оптимального управления авиаперевозками на базе узлового аэропорта «направленного» типа путем сведения их к частично целочисленной задаче линейного программирования значительной размерности. Приводится математическая модель системы трансферных перевозок и результаты оптимизации для модельного примера, полученные с использованием программной среды IBM ILOG OPL.

Ключевые слова: задача оптимизации, математическое программирование, маршрутная сеть типа «ось-спицы».

Abstract. The authors consider a solution to a set of problems of optimum control of air transport services on the basis of a hub airport of "directed" type by means of converging the problems to a partially integer-valued problem of linear programming of a significant dimension. The article introduces a mathematical model of a transfer transportation system and optimization results for the modelling example, received with the use of a program environment IBM ILOG OPL.

Keywords: optimization problem, mathematical programming, hub-and-spoke network.

Введение

Последние годы ознаменовались попытками российских авиакомпаний внедрить в перевозочную деятельность широко распространенную за рубежом модель авиаперевозок «ось – спицы» («hub-and-spoke»). Суть модели в том, что один из аэропортов, обслуживаемых сетью авиалиний авиакомпании, используется в качестве пересадочного узла (узлового аэропорта, или хаба) для организации перевозок из других (периферийных) аэропортов этой сети.

Сформированная на базе хаба радиальная сеть авиалиний называется маршрутной сетью «ось – спицы», а расписание движения воздушных судов (ВС) в пределах этой сети – «веерным» расписанием [1]. Особенность веерного расписания – волновой принцип, предполагающий наличие в течение не продолжительного интервала времени большого числа сначала прибывающих в хаб, а затем отправляющихся из хаба рейсов. Реализация волнового принципа позволяет трансферным пассажирам, совершающим пересадку в хабе, избежать длительного ожидания стыковочного рейса. Под стыковкой рейсов понимается такое совмещение времени прибытия предыдущего рейса и времени отправления следующего рейса, которое обеспечивает трансферному пассажиру и его багажу возможность пройти обслуживание в хабе и успеть на стыковочный рейс.

По признаку пространственной конфигурации сети «ось – спицы» принято выделять характерный тип хаба – так называемый «направленный» хаб. Направленным считается хаб, расположенный между двумя группами периферийных аэропортов на приблизительно равном от них расстоянии. Маршрутная сеть авиакомпании, использующей направленный хаб, строится таким образом, чтобы полеты начинались в периферийном аэропорту «по одну сто-

рону» от хаба, а заканчивались «по другую сторону» от него. Далее рассматриваются только пассажирские хабы направленного типа.

1. Задача оптимизации управления авиаперевозками

Принятию решения авиакомпанией о переходе к работе в соответствии с моделью «ось – спицы» должен предшествовать детальный технико-экономический анализ, содержащий решение задачи оптимизации управления авиаперевозками, которая включает комплекс оптимизационных подзадач, среди которых важнейшие [2]:

- 1) расстановка ВС по авиалиниям с учетом величин прямых и трансферных пассажиропотоков;
- 2) определение числа рейсов, выполняемых ВС в течение недели (недельной частоты движения);
- 3) распределение рейсов по интервалам времени, соответствующим волнам их прибытий-отправлений в хабе.

С учетом особенностей модели перевозок «ось – спицы» перечисленные задачи оптимизации должны решаться совместно. Для их решения используются методы математического программирования. В рамках рассматриваемой модели предполагается, что авиакомпания, располагающая определенным авиапарком, планирует реализовать модель перевозок «ось – спицы» между известными аэропортами. В качестве расчетного принят недельный интервал времени. Известны спрос на перевозки, себестоимость выполнения рейсов и тарифы.

Критерием оптимальности является операционная прибыль авиакомпании от перевозки пассажиров.

Далее под авиасвязью понимается упорядоченная пара аэропортов, включающая аэропорты отправления и назначения, между которыми возможна воздушная перевозка, т.е. имеются регулярные воздушные линии. Авиасвязь может обеспечиваться несколькими воздушными линиями, проходящими через различные промежуточные аэропорты, благодаря чему в пределах одной авиасвязи возможны несколько вариантов перевозки пассажиров. Авиасвязи в прямом и обратном направлениях рассматриваются далее как различные односторонние авиасвязи. Под трансферной авиасвязью понимается авиасвязь, предполагающая наличие аэропорта трансфера.

Задача оптимизации управления перевозками на базе узлового аэропорта здесь формулируется следующим образом. С учетом уровня спроса на прямые и трансферные перевозки на заданной сети авиалиний узлового аэропорта распределить по рейсам имеющиеся в наличии ВС нескольких типов, сформировать их графики оборота на основе веерного расписания узлового аэропорта, обеспечив максимальную суммарную прибыль от выполнения транспортных операций.

2. Расчетная модель

Предполагается, что в течение одних суток ВС может выполнить не менее двух парных рейсов в любой из периферийных аэропортов. Прилеты ВС в хаб и вылеты из него образуют в течение суток две волны. Это означает, что суточный интервал разбивается на четыре временных промежутка, отводимых для выполнения рейса в одном направлении. Возможности выполнения прямых рейсов между периферийными аэропортами не учитываются.

Используются обозначения:

K – число периферийных аэропортов (индекс «0» соответствует хабу);

D – число потенциально возможных волн прилетов-вылетов рейсов;

V – число типов ВС;

q_{ij} – планируемое число пассажиров из i -го аэропорта в j -й аэропорт (спрос), $i, j \in \{0, K\}$; если $i = j$, то $q_{ij} = 0$;

t_{ij} – тариф из i -го в j -й аэропорт в одном направлении (от типа ВС не зависит), $i, j \in \{0, K\}$; если $i = j$, то $t_{ij} = 0$;

$G = 2D + 1$ – число интервалов для выполнения рейсов в одном направлении (из хаба или в хаб) при реализации веерного расписания;

B_v – число ВС типа v , $v \in \{1, V\}$;

b – порядковый номер ВС. ВС первого типа имеют порядковые номера $b \in \{1, \dots, B_1\}$, ВС второго типа – $b \in \{(B_1 + 1), \dots, (B_1 + B_2)\}$ и т.д.;

p_b – пассажировместимость ВС с порядковым номером b ;

c_{bij} – параметр, выражающий величину расходов на рейс. При $i = 0$, $j \neq 0$, либо $i \neq 0$, $j = 0$ представляет собой значение себестоимости рейса между хабом и аэропортом в прямом или обратном направлениях соответственно. В общем случае расходы на рейс «туда» могут отличаться от расходов на рейс «обратно» – $c_{bij} \neq c_{bji}$. При $i = j$ параметр c_{bij} выражает величину затрат на сверхнормативную стоянку b -го ВС, командировочные экипажа и т.д. в случаях, когда оно остается в аэропорту, «пропуская» очередной интервал для выполнения рейса. Чтобы исключить возможность реализации случая $i \neq j$, $i, j \neq 0$, соответствующего прямому рейсу из одного периферийного аэропорта в другой, величина c_{bij} принимается равной бесконечности;

h_{bg} – номер аэропорта назначения b -го ВС, выполняющего рейс в течение g -го интервала, $h_{bg} \in \{0, K\}$, $b \in \{1, B\}$, $g \in \{1, G\}$. Если $h_{b(g-1)} = h_{bg}$, b -е ВС остается в аэропорту g ;

y_{bdi}^O – число прибывших в хаб из аэропорта i пассажиров, отправленных из хаба рейсом, выполненным b -м ВС в течение d -й волны, $b \in \{1, B\}$, $d \in \{1, D\}$, $i \in \{0, K\}$. Если $i = 0$ – пассажиры начальные, в противном случае – трансферные;

y_{bdj}^{Π} – число отправленных из хаба в аэропорт j пассажиров, прибывших в хаб рейсом, выполненным b -м ВС в течение d -й волны, $b \in \{1, B\}$, $d \in \{1, D\}$, $j \in \{0, K\}$. Если $j = 0$ – пассажиры конечные, в противном случае – трансферные;

z_{bdij}^O – число прибывших в хаб из аэропорта i пассажиров, отправленных из хаба в аэропорт j рейсом, выполненным b -м ВС в течение d -й волны, $b \in \{1, B\}$, $d \in \{1, D\}$, $i, j \in \{0, K\}$. Величина z_{bdij}^O связана с y_{bdi}^O следующим выражением:

$$z_{bdij}^O = \begin{cases} y_{bdi}^O, & \text{если } h_{b(2d+1)} = j, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

z_{bdij}^{Π} – число отправленных из хаба в j -й аэропорт пассажиров, прибывших в хаб из аэропорта i -м рейсом, выполненным b -м ВС в течение d -й волны, $b \in \{1, B\}$, $d \in \{1, D\}$, $i, j \in \{0, K\}$. Величина z_{bdij}^{Π} связана с y_{bdi}^{Π} :

$$z_{bdij}^{\Pi} = \begin{cases} y_{bdi}^{\Pi}, & \text{если } h_{b(2d-1)} = i, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

s_{ij} – минимальная плановая недельная частота перевозки на авиасвязи между i -м и j -м аэропортами, $i, j \in \{0, K\}$, $i \neq j$.

Операционная прибыль авиакомпании в рамках модели формируется как сумма доходов от перевозки трех категорий пассажиров (начальных, отправленных из хаба; конечных, принятых в хабе; трансферных, принятых в хабе (или отправленных из хаба)) за вычетом суммарных расходов на выполнение рейсов. Таким образом, выражение для целевой функции запишется как

$$\begin{aligned} \Pi = & \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^K z_{bd0j}^{\Pi} t_{0j} + \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^K z_{bdi0}^{\Pi} t_{i0} + \\ & + \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K z_{bdij}^{\Pi} t_{ij} - \sum_{b=1}^B \sum_{g=2}^G c_b [h_{b(g-1)}] [h_{bg}] \rightarrow \max. \end{aligned}$$

В накладываемых на задачу ограничениях выделяются две группы, первая из которых связана с числом пассажиров различных категорий, обслуживаемых в хабе, а вторая – с требованиями, предъявляемыми к маршруту движения ВС в рамках веерного расписания и частотам перевозки. В терминологии теории графов маршрут ВС представляет собой ориентированный граф, в котором все дуги попарно различны, т.е. цепь. Должны быть запрещены полеты ВС из одного периферийного аэропорта в другой, минуя хаба. Маршрут движения ВС не должен иметь разрывов – аэропорт, из которого ВС отправляется в хаб для последующего формирования волны прилетов-вылетов, должен совпадать с аэропортом, в который ВС ранее прибыло из хаба. По окончании рассматриваемого интервала времени ВС должно возвращаться в аэропорт, из которого оно вылетело в начале данного интервала.

Ограничения суть следующие:

1) на суммарное число пассажиров, следующих через хаб из нескольких аэропортов, отправленных из хаба одним рейсом на ВС b в течение волны d

$$\sum_{i=0}^K y_{bdi}^{\Pi} \leq x_{bd}^{\Pi}, \quad d \in \{1, D\}, \quad b \in \{1, V\},$$

где x_{bd}^{Π} – логическая переменная, определяющая наличие отправленного из хаба рейса b -го ВС в течение волны d :

$$x_{bd}^{\Pi} = \begin{cases} 1, & \text{если } h_{b(2d)} \neq h_{b(2d+1)}, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

2) на суммарное число пассажиров, следующих через хаб в несколько аэропортов, прибывших в хаб одним рейсом на ВС b в течение волны d :

$$\sum_{i=0}^K y_{bdi}^{\Pi} \leq x_{bd}^{\Pi} p_b, \quad d \in \{1, D\}, \quad b \in \{1, B\},$$

где x_{bd}^{Π} – логическая переменная, определяющая наличие прибывшего в хаб рейса b -го ВС в течение волны d :

$$x_{bd}^{\Pi} = \begin{cases} 1, & \text{если } h_{b(2d-1)} \neq h_{b(2d)}, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

3) на суммарное число начальных пассажиров хаба:

$$\sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D z_{bd0}^O \leq q_{0j}, \quad j \in \{1, K\};$$

4) на суммарное число конечных пассажиров хаба:

$$\sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D z_{bdi0}^{\Pi} \leq q_{i0}, \quad i \in \{1, K\};$$

5) на суммарное число трансферных пассажиров:

$$\sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D z_{bdij}^O \leq q_{ij}, \quad \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D z_{bdij}^{\Pi} \leq q_{ij}, \quad i, j \in \{1, K\};$$

6) на равенство отправок и прибытий трансферных пассажиров в хабе на определенной трансферной авиасвязи в течение одной волны

$$\sum_{b=1}^B z_{bdij}^O = \sum_{b=1}^B z_{bdij}^{\Pi}, \quad d \in \{1, D\}, \quad i, j \in \{1, K\};$$

7) на условия отсутствия разрывов в цепи и отсутствия дуг, связывающих два периферийных аэропорта (должно выполняться одно из двух условий):

а) $h_{b(2d)} = 0$ – самолет направляется в хаб из периферийного аэропорта;

б) $h_{b(2d-1)} = h_{b(2d)}$ и $h_{b(2d)} = h_{b(2d+1)}$ – самолет остается в аэропорту;

8) на условие совпадения пункта начала и конца маршрута движения ВС:

$$h_{b1} = h_{bG}, \quad b \in \{1, B\};$$

9) на минимальное недельное число рейсов на односторонней авиасвязи хаб – j -й аэропорт:

$$\sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D r_{bdj}^O \geq s_{0j}, \quad j \in \{1, K\},$$

где r_{bdj}^O – логическая переменная, определяющая наличие отправленного из хаба в j -й аэропорт рейса b -го ВС в течение волны d :

$$r_{bdj}^O = \begin{cases} 1, & \text{если } h_{b(2d)} \neq h_{b(2d+1)} \text{ и } h_{b(2d+1)} = j, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

10) на минимальное недельное число рейсов на односторонней авиасвязи (i -й аэропорт – хаб)

$$\sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D r_{bdi}^{\Pi} \geq s_{i0}, \quad i \in \{1, K\},$$

где r_{bdi}^{Π} – логическая переменная, определяющая наличие прибывшего в хаб из i -го аэропорта рейса b -го ВС в течение волны d :

$$r_{bdi}^{\Pi} = \begin{cases} 1, & \text{если } h_{b(2d)} \neq h_{b(2d-1)} \text{ и } h_{b(2d-1)} = i, \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

11) на минимальную недельную частоту перевозки на односторонней трансферной авиасвязи из i -го в j -й аэропорт:

$$\sum_{d=1}^D \min \left(\sum_{b=1}^B r_{bdi}^{\Pi}, \sum_{b=1}^B r_{bdj}^O \right) \geq s_{ij}, \quad i, j \in \{1, K\}, \quad i \neq j.$$

Последние четыре ограничения не являются обязательными. Наличие в модели условия 8 обеспечивает равенство числа прямых и обратных рейсов на авиасвязи между хабом и периферийным аэропортом. В этом случае для задания минимально необходимого недельного числа рейсов на такой авиасвязи достаточно использовать одно из ограничений – 9 или 10.

На решение сформулированной выше оптимизационной задачи определяющее влияние будет оказывать уровень тарифов авиаперевозки. Поэтому с целью оценки этого влияния представляется целесообразным получить ряд оптимальных решений в широком диапазоне уровней тарифов.

Считается, что расчет тарифов производится авиакомпаниями в предположении о неполной занятости кресел, выражающейся коэффициентом K_{3M} . Уровень тарифов должен обеспечивать авиакомпании возможность получения определенной недельной величины операционных доходов D :

$$D = C(1 + K_p),$$

где K_p – плановая рентабельность перевозки; C – суммарная плановая себестоимость перевозки всех пассажиров.

Тариф прямой перевозки из периферийного аэропорта в хаб или обратно называется базовым; тариф трансферной перевозки между двумя периферийными аэропортами через хаб, состоящей из двух участков, – трансферным. В соответствии с принципом дифференцирования уровня тарифных ставок в зависимости от расстояния перевозки, величина трансферного тарифа составляет определенную долю K_T от суммы базовых тарифов по участкам.

В случае выполнения перевозок на авиалинии ВС различных типов в модели используется максимальная из предварительно рассчитанных для

каждого типа ВС величина тарифа, которая принимается одинаковой для всех типов ВС.

3. Результаты оптимизации

Ниже изложены основные результаты решения сформулированной задачи оптимизации на модельном примере. Рассмотрена система трансферных перевозок, сформированная на основе «направленного» хаба. Его прообразом послужил аэропорт Храброво (г. Калининград), на базе которого авиакомпанией «КДавиа» в 2007–2009 гг. выполнялись массовые пассажирские трансферные перевозки между аэропортами РФ и Западной Европы. На начальном этапе проекта сеть «ось – спицы», в которую были включены 10–12 аэропортов РФ и 14 западноевропейских, обслуживалась 14–15 ВС типа Boeing-737. В рамках веерного расписания ежедневно утром осуществлялись вылеты из городов РФ в Калининград. В интервале 9.00–11.00 происходило «волновое» прибытие ВС в Храброво. Трансферные пассажиры проходили обслуживание и ожидали посадку на международные рейсы в пределах одного терминала. С 12.15 с интервалом в 5–10 мин осуществлялся «волновой» вылет рейсов в Европу. Обратное движение самолетов из Европы в Россию реализовалось аналогично со стыковкой в Храброво в диапазоне 19.00–22.00 местного времени. На ночную стоянку самолеты «КДавиа» размещались в аэропортах городов РФ.

В модельном примере использованы скорректированные данные о распределении пассажиропотоков аэропорта по 10 основным авиасвязям. Рассматривались возможности использования авиапарка, включающего один или два (различной вместимости) типа ВС, имеющих крейсерскую скорость и дальность, обеспечивающие возможность выполнения не менее двух парных рейсов в любой из периферийных аэропортов в течение суточного интервала.

Для описания исходных данных по уровню недельного спроса вводится так называемая трансферная матрица $\mathbf{D}_T$, имеющая размерность $(K+1) \times (K+1)$. Ее элемент d_{Tij} представляет собой долю пассажиропотока на авиасвязи из i -го в j -й аэропорт в общем планируемом недельном пассажиропотоке хаба Q :

$$Q = Q_H + Q_K + Q_T = \sum_{j=1}^K q_{0j} + \sum_{i=1}^K q_{i0} + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K q_{ij} = \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^K q_{ij},$$

где Q_H , Q_K , Q_T – планируемое число соответственно начальных, конечных и трансферных пассажиров.

Набор исходных данных для решения задач оптимизации управления авиaperевозками на базе хаба приводится в табл. 1. Он включает значения компонентов d_{Tij} трансферной матрицы для авиасвязей хаба с десятью выбранными российскими и западноевропейскими аэропортами, обеспечивающими наиболее интенсивные пассажиропотоки. Для каждого аэропорта приводятся следующие параметры: категория перевозки (внутренние воздушные линии (ВВЛ) или международные воздушные линии (МВЛ)); расстояние L_i между хабом и аэропортом; себестоимость c_{vi}^* рейсов ВС двух типов

($p_1 = 140$ чел. и $p_2 = 70$ чел.) и затраты $c_{b(i=j)}^*$, связанные со стоянкой ВС в аэропорту в случае, если ВС «пропускает» очередной интервал для выполнения рейса, отнесенные к себестоимости рейса ВС первого типа в первый периферийный аэропорт. Модельные данные по стоимостным характеристикам перевозки соответствуют реальным приближенно.

Рассмотрены два варианта, отвечающие двум уровням спроса. Базовый вариант соответствует зафиксированному недельному пассажиропотоку на рассматриваемых авиасвязях хаба, составляющему около 7600 пассажиров. Модельный вариант соответствует модельному двукратному увеличению спроса. Доля трансферных пассажиров в общем пассажиропотоке по данным табл. 1 составляет 33,3 %. При расчете тарифов принимались следующие значения коэффициентов: $K_{3M} = 0,7$; $K_T = 0,8$.

Оценивалось влияние на целевую функцию таких параметров, как уровень потенциального спроса, величина авиатарифов, наличие ограничений на минимальные частоты перевозки, численность и состав авиапарка.

Пример результатов решения задачи оптимизации при использовании четырех однотипных ВС ($V = 1$) приведен в табл. 2. Строка таблицы отражает маршрут движения одного ВС в течение недели. Столбец соответствует временному интервалу, в течение которого возможен полет в одном направлении по авиалинии «хаб – периферийный аэропорт». Числа в последующих столбцах – аэропорты назначения для каждого из указанных временных интервалов.

Полужирным шрифтом в табл. 2 выделены аэропорты РФ, курсивом – хаб. Выделенный фон имеет ячейка, соответствующая единственному случаю, когда ВС остается в аэропорту и пропускает интервал для выполнения рейса. Такая ситуация особенно часто наблюдается при малых уровнях доходности, принятых авиакомпанией при расчете тарифов. Выявляется некоторое число рейсов, движение которых не подчиняется общему направлению прилетов-вылетов в течение волны. Так, при перевозке в направлении РФ – хаб – Западная Европа большинство вылетающих из хаба рейсов направляются в зарубежные аэропорты. Однако выявляются отдельные рейсы, следующие в это время в аэропорты РФ, которыми перевозятся только первоначальные пассажиры ВВЛ. Аналогично в течение волны прилетов-вылетов в направлении Западная Европа – хаб – РФ наблюдаются рейсы, вылетающие из хаба за рубеж, которыми следуют первоначальные пассажиры МВЛ.

Рассмотренному случаю соответствует оптимальное число «перевезенных» пассажиров (7329 человек), что составляет около 96 % от потенциального спроса. Трансферные пассажиры в общем пассажиропотоке составляют 31,1 %. Загрузка рейсов неравномерна, малая занятость некоторых из них объясняется необходимостью подвоза трансферных пассажиров к стыковочным рейсам. Несмотря на то, что средний коэффициент занятости мест (K_{3M}) не превышает 63 %, перевозки являются прибыльными.

Для сочетания исходных данных, соответствующих рассмотренному выше примеру, решалась задача подбора числа ВС, обеспечивающего максимум прибыли. Оптимальным оказалось два ВС рассматриваемого типа, что обеспечило увеличение прибыли на 29 % относительно исходного числа ВС, равного четырем.

Таблица 1

Исходные данные

j, i	$d_{Tij}, \%$										$L_i, \text{ км}$	c_{1i}^*	c_{2i}^*	$c_{b(i=j), b \in \{1, \dots, B_1\}}^*$	$c_{b(i=j), b \in \{(B_1+1), \dots, (B_1+B_2)\}}^*$	Категория перевозок
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
0	0	3,85	3,85	3,85	3,85	2,57	4,49	4,49	1,92	2,57	1,92	—	—	0,01	0,01	—
1	3,85	0	0	0	0	0	,92	1,05	,59	,60	,59	1,460	0,55	0,03	0,02	ВВЛ
2	3,85	0	0	0	0	0	,98	1,19	,39	,58	,38	1,580	0,70	0,04	0,02	ВВЛ
3	3,85	0	0	0	0	0	1,05	1,18	,38	,58	,43	3,290	0,95	0,05	0,03	ВВЛ
4	3,85	0	0	0	0	0	,97	1,17	,62	,80	,60	1,915	0,67	0,04	0,02	ВВЛ
5	2,57	0	0	0	0	0	,79	,77	,41	,59	,37	3,350	0,85	0,04	0,02	ВВЛ
6	4,49	,92	,94	,90	,89	,65	0	0	0	0	0	1,005	0,60	0,33	0,03	МВЛ
7	4,49	,96	,92	,92	,94	,54	0	0	0	0	0	950	0,60	0,33	0,03	МВЛ
8	1,92	,46	,47	,45	,31	,33	0	0	0	0	0	1,560	0,90	0,50	0,03	МВЛ
9	2,57	,62	,62	,60	,59	,31	0	0	0	0	0	2,015	1,30	0,70	0,04	МВЛ
10	1,92	,43	,45	,46	,31	,34	0	0	0	0	0	1,415	0,80	0,44	0,03	МВЛ

Таблица 2

Пример результатов оптимизации $K_p = 1, 2, B_1 = 4$,
 $\bar{Q} = 7600$ пассажиров, ограничения на частоты не наложены

b	На	d (номера волн прилетов-вылетов)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	0	6	0	1	0	6	0	4	0	6	0	8	0	2
2	3	0	9	0	3	0	10	0	5	0	4	0	10	0	3
3	1	0	10	0	5	0	8	0	3	0	7	0	6	0	1
4	4	0	7	0	2	0	7	0	1	0	3	0	7	0	4

Примечание. На — номер начального аэропорта маршрута.

При этом коэффициент занятости возрос до 93,3 %, доля «перевезенных» пассажиров составила около 81 % от потенциального спроса, а доля трансферного пассажиропотока снизилась до 18,9 % от общего пассажиропотока.

Использование нескольких типов ВС позволяет повысить прибыльность перевозок в случае ограниченного потенциального спроса при высоких требованиях к частотам перевозки. В приведенном выше примере замена двух из четырех ВС большого типа на два ВС малого типа позволяет на 30–42 % повысить величину прибыли. При этом предполагается, что недельная частота перевозки на прямых авиасвязях составляет не менее 3–5, на трансферных – не менее 1–3. При повышении спроса на перевозки эффективность использования авиапарка, состоящего из двух типов ВС, снижается.

Влияние планового уровня рентабельности, задаваемого при расчете тарифов коэффициентом K_p , на целевую функцию, на оптимизируемые и связанные с ними параметры для авиапарка в составе четырех ВС большого типа ($p = p_1 = 140$ человек) представлено на рис. 1.

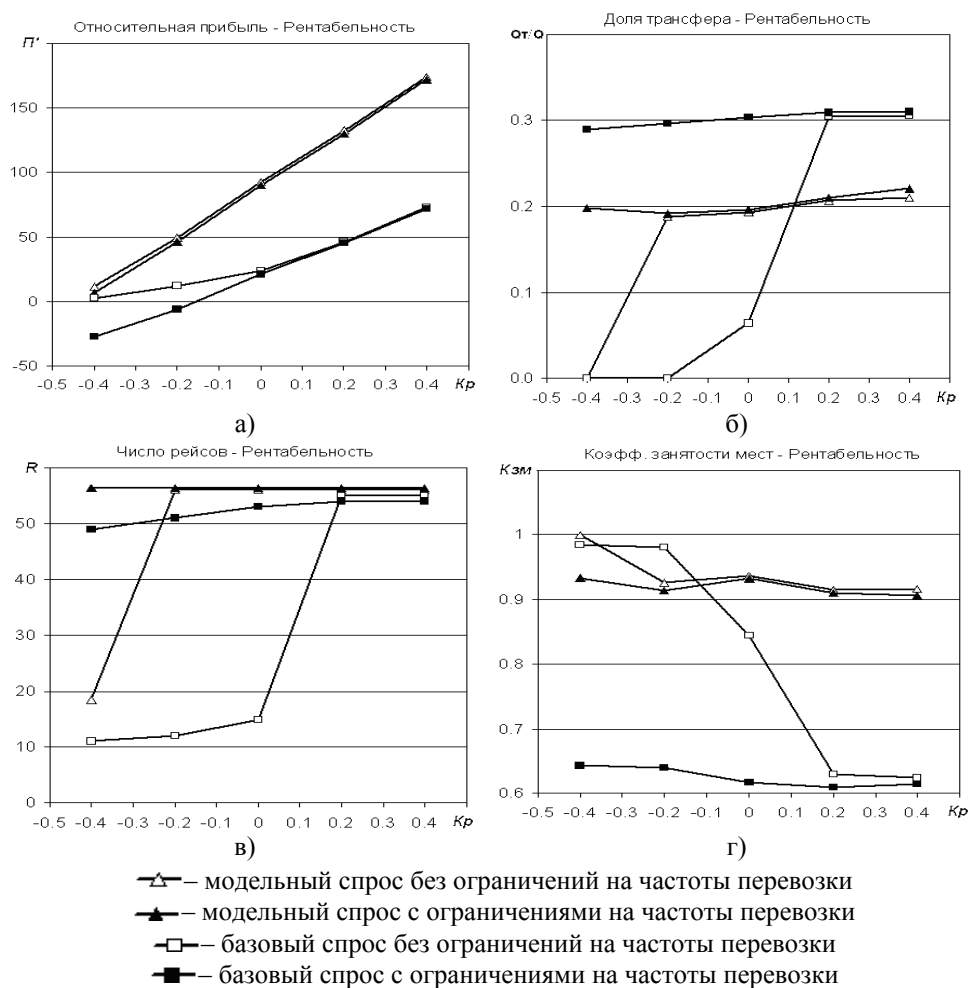


Рис. 1. Влияние уровня рентабельности на характеристики транспортной операции: а – суммарную прибыль, отнесенную к себестоимости рейса в первый периферийный аэропорт; б – долю трансферных пассажиров в общем числе обслуженных пассажиров хаба; в – суммарное число рейсов; г – коэффициент занятости мест

Оптимизация проводилась для двух уровней спроса (базового и модельного) при учете ограничений на минимальные недельные частоты перевозки и без их учета.

Учет ограничений по недельным частотам перевозки при малых плановых уровнях доходности приводит к следующему. В случае наличия достаточного спроса перевозки остаются прибыльными, поэтому результаты с учетом ограничений по числу рейсов и без учета этих ограничений близки. Понижение спроса приводит к значительному снижению прибыли, что вызвано необходимостью выполнения заданного числа рейсов при малой занятости кресел.

Повышение прибыли при заданной частоте перевозки обеспечивается увеличением занятости мест за счет увеличения количества трансферных пассажиров, поэтому при малом общем уровне пассажиропотока доля трансфера возрастает.

Наличие значительного пассажиропотока, соответствующего модельному варианту спроса, приводит к интенсивной эксплуатации авиапарка: ВС выполняют максимально возможное число рейсов ($4 \text{ ВС} \times 7 \text{ дней} \times 2 \text{ парных рейса/день} = 56 \text{ рейсов/нед.}$) при средней занятости кресел более 90 %.

Программным средством реализации описанной выше оптимизационной модели послужил пакет IBM ILOG OPL, использование которого даже на типовых ПЭВМ не приводило к чрезмерным затратам машинного времени.

Список литературы

1. **Романенко, В. А.** Математические модели функционирования аэропортов в условиях современного авиатранспортного рынка / В. А. Романенко. – Самара : АсГард, 2010. – 244 с.
2. **Бородин, В. М.** Оптимизация управления авиаперевозками. Ч. 2. Моделирование оптимального управления авиаперевозками / В. М. Бородин. – СПб. : Академия ГА, 1995. – 88 с.

Потапов Иван Валентинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра организации и управления
перевозками на транспорте,
Национальный исследовательский
аэрокосмический университет
«Самарский государственный
аэрокосмический университет»

E-mail: ivp-55@mail.ru

Potapov Ivan Valentinovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of transport
conveyance control and organization,
National research aerospace university
“Samara State Aerospace University”

Романенко Владимир Алексеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра организации и управления
перевозками на транспорте,
Национальный исследовательский
аэрокосмический университет
«Самарский государственный
аэрокосмический университет»

E-mail: vla_rom@mail.ru

Romanenko Vladimir Alekseevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of transport
conveyance control and organization,
National research aerospace university
“Samara State Aerospace University”

УДК 658.5.012.122 : 519.876.5

Потапов, И. В.

Синтез оптимального управления трансферными авиаперевозками методами математического программирования / И. В. Потапов, В. А. Романенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 75–86.

Г. В. Суровицкая, Д. В. Шитов, Т. Б. Комиссарова

ПРОГРАММНО-СЕРВИСНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА УНИВЕРСИТЕТА

Аннотация. Приведен анализ видов управленческой деятельности университета во взаимосвязи с функциями управленческой документации как важнейшего механизма управления. Представлена анализируемая структура документации университета и предложена структура системы документации менеджмента качества, даны основные характеристики документов этой системы и системы управления документацией. Предложены и описаны программно-сервисные средства управления документами «Витрина документов». Изложено обоснование и основные этапы разработки данного программного средства.

Ключевые слова: оптимизация документооборота, документация системы менеджмента качества (СМК), система документации СМК, система управления документацией СМК, веб-приложение, Витрина документов.

Abstract. In article the analysis of kinds of administrative activity of university in interrelation with functions of the administrative documentation as major mechanism of management is resulted. The analyzed structure of the documentation of university is presented and the structure of system of the documentation of quality management is offered, the basic characteristics of documents of this system and a control system of the documentation are given. Programm-service control facilities documents «The Documents Display» are offered and described. The substantiation and the basic development cycles of the given software is stated.

Key words: workflow optimization, Quality management system (QMS) documentation, QMS's documentation system, QMS's, Web-application, The documents display.

Введение

На современном этапе модернизации системы высшего профессионального образования России особое внимание уделяется проблемам качества образования и оптимизации систем менеджмента качества (СМК) университетов. Одним из основных направлений развития СМК университетов является оптимизация документооборота с использованием информационных технологий.

1. Состав документации СМК университета и особенности ее управления

При создании программно-сервисных средств управления документацией и проведении последующих мероприятий по совершенствованию документационного обеспечения управления наиболее существенными являются вопросы классификации, систематизации и выбора оптимального состава документации системы менеджмента качества университета [1]. Эти вопросы обостряются, во-первых, взаимодействием системы документации СМК с общей системой управления вузом, когда эти системы, как правило, создаются и существуют параллельно и обособленно друг от друга; во-вторых, документация должна строиться на новых принципах, так как должна отражать

системный и процессный подходы, исходя из принципов менеджмента качества [2], что неизбежно влечет за собой необходимость разработки и внедрения корпоративных стандартов, инструкций и регламентов.

Ставя перед собой цель создания системы управления документацией СМК как информационного ресурса деловой деятельности университета, который должен поддерживать его последующую деятельность и обеспечивать отчетность [3], целесообразно начинать работу с осмысленного анализа существующего в университете механизма управления с учетом требований стандартов ИСО 9001.

На основе анализа управленческой деятельности университета и классификации видов документов по функциям управления построена система документации университета, представленная в табл. 1.

Таблица 1

Система документации университета

Функция управления	Подсистемы документации, соответствующей функции управления
1. Организационная функция	Учредительные документы
	Организационно-правовые документы
2. Функция планирования	Документы стратегического планирования
	Документы среднесрочного планирования
	Документы оперативного планирования
3. Координационная функция	Регистрационные документы
4. Контрольная функция	Распорядительные документы
5. Учетная функция	Документация учетного характера
6. Информационная функция	Информационно-справочные документы
7. Корректирующая функция	Документы оперативного планирования

При построении системы документации СМК необходимо, во-первых, оптимизировать существующую документацию; во-вторых, минимизировать работу по актуализации существующих документов; в-третьих, как можно более безболезненно обеспечить выполнение требования стандартов ИСО по разработке документов СМК, основанных на процессном и системном принципах; в-четвертых, выполнить требование информационного обеспечения деятельности, которое в идеале должно состоять из трех основных подсистем информации: текущей, обзорно-аналитической и прогностической.

Обеспечивая вышеперечисленные требования, существующую систему документации университета необходимо дополнить некоторыми специфическими документами СМК, а некоторые существующие документы изменить, причем в состав системы документации СМК не должны входить организационные и финансовые документы, не предусмотренные стандартами ИСО 9001. В таком случае система документации СМК должна состоять из следующих подсистем документации: планово-прогностической, нормативной, процедурной и информационно-справочной, причем последняя подсистема документации должна также подлежать анализу на предмет присутствия в ее документах объективных доказательств выполнения определенных требований (в терминологии ИСО 9001 – записи) и выглядеть следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Система документации СМК

Подсистемы документации		Виды документов
Планово-прогностическая документация		Политика и цели в области качества, политика в области управления документацией; план качества, план-график совещаний «День качества»; программы внутренних аудитов; планы корректирующих и предупреждающих действий; планы процессов СМК
Внутренняя нормативная документация		Руководство по качеству; шесть обязательных документированных процедур; СТУ в области качества; классификаторы; спецификации процессов СМК
Процедурная документация (документированные процедуры)		Инструкции; методические рекомендации; методические указания; методики; правила
Записи	Информационно-справочная документация	Протоколы совещаний «День качества»; отчеты о функционировании процессов СМК; справки-отчеты об устранении несоответствий; отчет «Анализ со стороны руководства»; отчет «Анализ данных»; отчет о SWOT-анализе; отчет о самооценке деятельности; служебные записки; информационные справки; номенклатуры дел СМК
		Реестры рабочих процессов СМК и структурные схемы их взаимодействия; матрицы распределения ответственностей и полномочий; отчеты о самооценке деятельности; отчеты о SWOT-анализе
	Регистрационная документация	Журналы регистрации и ознакомления с документацией СМК; журналы мониторинга процессов СМК; журналы мониторинга средств мониторинга; журнал регистрации замечаний и предложений потребителей и других заинтересованных сторон

Все виды документов, входящих в систему документации СМК, должны иметь свою специфику в разработке и оформлении, удовлетворять требованиям стандартов ИСО 9001 и обладать следующими характеристиками: аутентичностью, достоверностью и своевременностью, целостностью, надежностью; они в любой момент должны быть идентифицированы. Из этого следует, что сама система должна быть управляемой, что требует разработки документированной процедуры, содержащей требования и процедуры всех процессов управления документацией: проектирования и создания документов, хранения и использования в текущей деятельности, уничтожения и передачи на архивное хранение.

На современном этапе совершенствования деятельности университета в условиях функционирования СМК неизбежно сосуществование электронного и бумажного документооборота, однако тенденции перехода организаций на безбумажные технологии управления усиливаются, так как их внедре-

ние позволяет снизить внутренние издержки, ускорить бизнес-процессы и повысить эффективность организации в целом [4].

Большинство предлагаемых программных решений являются весьма дорогими, требуют наличия квалифицированных специалистов для внедрения и сопровождения системы, а также сложны в использовании, что, в свою очередь, приводит к трудностям освоения той или иной системы и необходимости обучения пользователей [5]. Большинство предлагаемых такими системами функций может оказаться ненужным.

В связи с этим необходимо предложить университетам недорогие программные решения, которые отвечают запросам потребителей.

2. Витрина документов

Витрина документов является специализированным программным средством для повышения эффективности работы с документами. Витрина документов – это веб-приложение для представления документов с возможностью настройки доступа пользователей к этим документам.

Разработанная Витрина документов является разновидностью системы управления контентом (CMS).

Главной целью такой системы является возможность собирать в единое целое и объединять на основе ролей и задач все разнотипные источники знаний и информации, доступные как внутри организации, так и за ее пределами, а также возможность обеспечения взаимодействия сотрудников, рабочих групп и проектов с созданными ими базами знаний, информацией и данными так, чтобы их легко можно было найти, извлечь и повторно использовать привычным для пользователя образом.

В системе управления содержимым могут быть определены самые различные данные: документы, фильмы, фотографии, номера телефонов, научные данные и т.д. Такая система часто используется для хранения, управления, пересмотра и публикации документации.

При разработке Витрины документов поставлена задача управления документацией организации. При этом основной единицей контента (содержимого) должен являться документ. Была исследована возможность организации Витрины документов на базе существующих решений для управления содержимым. При анализе существующих систем управления контентом было выяснено, что вся их совокупность может быть представлена в виде пирамиды (рис. 1).

На вершине такой пирамиды находятся наиболее мощные и популярные решения. Они могут быть как платными, так и бесплатными. Ниже следует более многочисленная группа систем управления контентом, но включающая в себя менее популярные и эффективные решения. Наконец, в самом низу мы имеем множество малоизвестных, недокументированных систем, скриптов, плагинов и т.д.

Программные средства, представляющие верхушку пирамиды, оказались неприменимы, так как они не ориентированы на документ. В них единицей контента могут быть каталоги, ссылки, веб-страницы, разнотипные файлы и т.д. Менее распространенные и известные решения, располагающиеся ниже, если даже и могут обеспечить требуемый функционал для управления документами, то оказываются неприменимы ввиду неизвестности и затруд-

нительного внедрения. Таким образом, была обоснована необходимость разработки собственных программных средств управления документами.



Рис. 1. Пирамида решений для управления контентом

Разработанная Витрина документов отличается прежде всего ориентированностью на единицу контента – документ, а также:

- позволяет создавать древовидные структуры разделов веб-ресурса с неограниченной вложенностью;
- обеспечивает возможность разделения веб-страниц на подразделы;
- позволяет гибко разграничивать доступ пользователей к разделам в соответствии с правами доступа.

Рассмотрим возможности создания древовидной структуры разделов веб-ресурса и разделения веб-страниц на подразделы. Здесь можно говорить о двумерном дереве. Каждый узел, или «лист», такого дерева представляет собой не веб-страницу с информацией, а список ссылок, каждая из которых, в свою очередь, ведет на веб-страницу с информацией (документом) (рис. 2).

Данное дерево может «расти» в двух измерениях: по вертикали (кружки) и по горизонтали (прямоугольники). Этой картине может соответствовать структура некоторой организации, в которой есть развитая иерархия подразделений, и информация по каждому подразделению сгруппирована по некоторому признаку, например по годам.

Разграничение доступа пользователей к «ветвям» такого дерева предполагает, что пользователь, которому разрешен доступ к некоторому узлу дерева, имеет доступ и ко всем потомкам этого узла, а следовательно, и ко всем подразделам своего «домашнего» узла и его потомков.

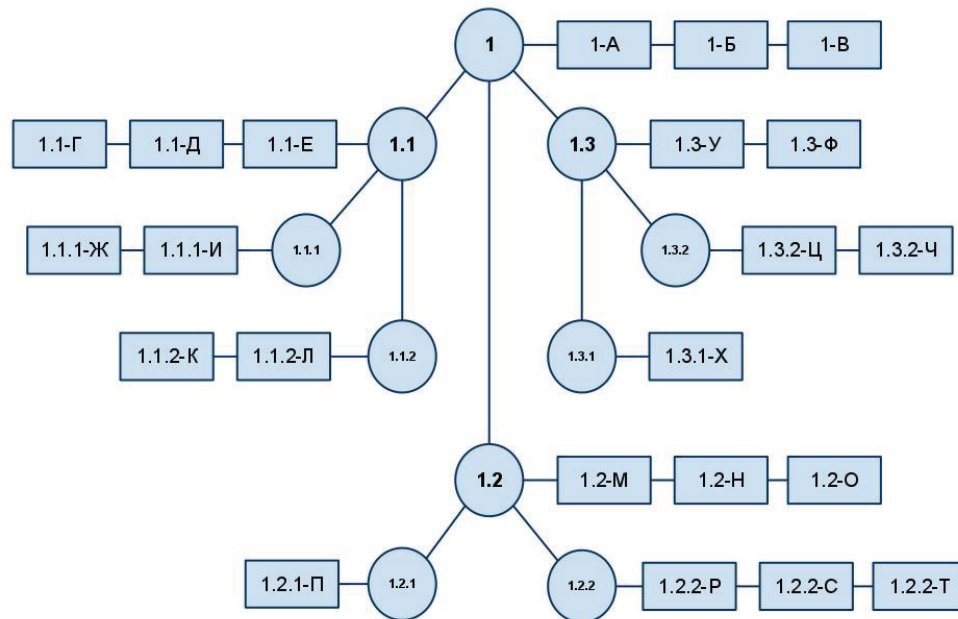


Рис. 2. Фрагмент двумерного дерева разделов и подразделов

Руководитель некоторого подразделения имеет доступ к информации своего подразделения и к информации всех дочерних подразделений. Руководитель всей организации имеет доступ ко всем подразделениям.

3. Хранение документов

Поскольку основной единицей информации, с которой работает Витрина, является документ, то принято решение использовать для создания, редактирования и хранения документов сервис Google Документы. Он позволяет создавать полноценные документы, подобные тем, которые создаются в таких редакторах, как MS Word. Это означает, что в них, кроме форматированной текстовой информации, могут быть размещены рисунки, таблицы, гиперссылки, колонтитулы и т.д. При этом интерфейс данного сервиса максимально приближен к интерфейсу привычных пользователю текстовых редакторов.

Для организации хранения документов в Google Документах предусмотрена возможность создания структуры каталогов, так что при большом количестве документов они могут быть привычным образом упорядочены по директориям (коллекциям).

Хранение документов на удаленном сервере обеспечивает еще и безопасность хранения документов, так как для получения доступа к какому-либо документу злоумышленнику необходимо будет взламывать сам сервис Google Документов.

Стабильность работы сервиса Google Документы также представляется гораздо более высокой, чем стабильность работы сервера, например, небольшой организации. То есть не надо беспокоиться о том, что сервер организации будет поражен каким-либо вирусом и уничтожит документы, либо отправит их на адрес злоумышленника.

Безопасность использования сервиса Google Документы также обеспечивается протоколом https. HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure) – расширение протокола HTTP, поддерживающее шифрование. Данные, передаваемые по протоколу HTTPS, «упаковываются» в криптографические протоколы SSL или TLS, тем самым обеспечивается защита этих данных. В отличие от HTTP, для HTTPS по умолчанию используется TCP-порт 443. HTTPS широко используется для веб-приложений, в которых важна безопасность соединения, например, в платежных системах. Каждая ссылка на тот или иной документ начинается с акронима HTTPS.

Для публикации документа в Витрине документов необходимо вставить ссылку этого документа в соответствующую форму ввода документа. В случае, если файлы Витрины документов были каким-либо образом повреждены и ее функционирование нарушено, документы не перестают быть доступными и к ним можно обратиться через интерфейс сервиса Google Документы.

Кроме текстовых документов, в Витрине документов могут быть представлены электронные таблицы, презентации, документы-рисунки и формы.

4. Взаимодействие Витрины документов с пользователями

Рассмотрим взаимодействие Витрины документов с пользователями (рис. 3).

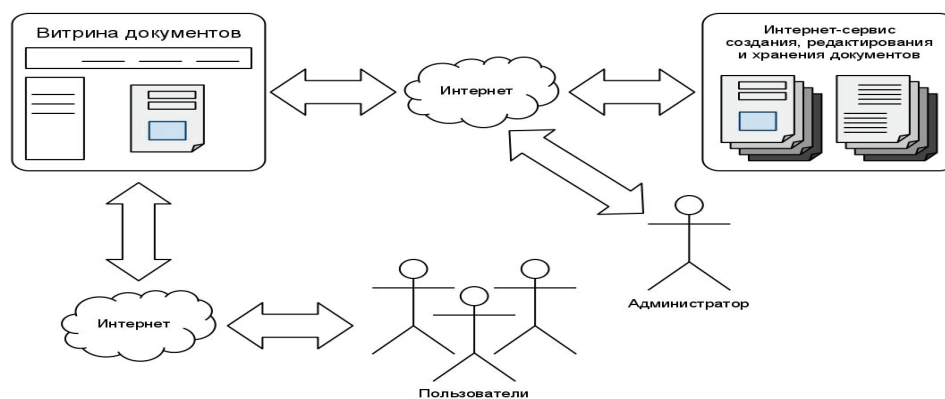


Рис. 3. Схема взаимодействия пользователей и Витрины документов

Все, что нужно пользователям для работы с Витриной документов, это доступ в Интернет и браузер (например, Internet Explorer).

Пользователь-администратор через Интернет имеет доступ к интернет-сервису для работы с документами (например, Google Документы) и к администраторским функциям Витрины документов. Для реализации этого доступа достаточно иметь на рабочем компьютере интернет-браузер одной из последних версий.

Посредством браузера и интернет-сервиса для работы с документами пользователь-администратор создает (или загружает) необходимые документы. В частности, сервис Google Документы позволяет еще и создать для хранения документов структуру каталогов. После создания документа в Google Документах генерируется HTML-код для вставки документа на веб-страницы.

Посредством того же браузера пользователь-администратор в рамках Витрины документов создает структуру организации, учетные записи пользователей и настраивает доступ пользователей – каждого к своему разделу (подразделению).

После того как для какого-либо подразделения создан свой раздел и в его рамках сформированы подразделы, пользователь-администратор может добавлять в них документы. Добавление документа предполагает вставку полученного ранее HTML-кода документа на веб-страницу этого документа в Витрине. Для выполнения этого действия в распоряжении администратора есть соответствующие элементы интерфейса.

Пользователь, который хочет просмотреть документ, авторизуется в Витрине (вводит логин и пароль). При этом ему открывается доступ к разделам в соответствии с его правами доступа. Если, например, данный пользователь является руководителем какого-либо подразделения, то ему становятся доступны только разделы, соответствующие его подразделению и его дочерним подразделениям. Пользователь должен выбрать один из доступных ему разделов и в нем – один из подразделов. В выбранном подразделе открывается список документов, принадлежащих данному подразделу. После выбора одного из документов он загружается в текущую страницу Витрины и отображается на этой же странице.

5. Интерфейсные решения

Использование ряда новых технологий позволило создать удобные интерфейсные решения.

Интерфейс является единым как для администратора Витрины документов, так и для остальных пользователей. Основными элементами пользовательского интерфейса являются: шапка страницы, навигационная панель, вертикальное меню разделов, горизонтальное меню разделов, список документов в текущем подразделе, область отображения документа.

Шапка страницы. Она содержит две строки, которые могут соответствовать заголовку и подзаголовку Витрины документов. Фоновые изображения могут быть изменены в соответствии с символикой организации, для которой предполагается использовать Витрину документов.

Навигационная панель. Здесь отображается текущее местоположение пользователя в иерархии разделов. Через эту панель пользователь может перейти в любую точку пройденного им по иерархии пути. Здесь же располагается приветственное сообщение и кнопка завершения сеанса «Выход». Если пользователь не авторизован на веб-ресурсе, то на этой панели располагаются поля ввода логина и пароля и кнопка «Вход».

Вертикальное меню разделов. Данное меню является иерархическим. Каждый пункт данного меню соответствует узлу дерева, помеченного цифрой на рис. 1. Если пользователь авторизовался в Витрине документов как Администратор, то он может динамически формировать данное меню. Для этого предусмотрены соответствующие пиктограммы: «удаление раздела», «редактирование раздела», «перемещение раздела вниз», «перемещение раздела вверх», «добавление нового раздела». Кнопка «Новый раздел» позволяет добавить новый раздел в текущее подменю. Для добавления корневого раздела необходимо сделать это с главной страницы.

Горизонтальное меню подразделов. Его функционирование аналогично вертикальному меню разделов. Управление горизонтальным меню осуществляется аналогичными кнопками, обозначенными пиктограммами: «удаление подраздела», «редактирование подраздела», «перемещение подраздела влево», «перемещение подраздела вправо», «добавление нового подраздела».

Список документов в текущем подразделе. В текущем подразделе управление списком доступных в подразделе документов осуществляется по аналогии с двумя рассмотренными выше меню.

Область отображения документа. После того как документ выбран в подразделе, он загружается в область отображения документа. Для удобного просмотра документа эта область может быть развернута на всю площадь веб-страницы. Нажатие на полосу над областью отображения документа приводит к скрытию меню разделов, подразделов и списка документов. Повторное нажатие на эту полосу делает скрытые элементы вновь доступными.

Модальные окна. Для повышения удобства пользования были применены так называемые модальные окна (рис. 4). Их использование целесообразно при реализации тех вариантов использования, в рамках которых пользователю необходимо показать некоторую информацию на короткий промежуток времени либо организовать ввод данных.

![Screenshot of a modal window titled 'Добавление документа' (Add document). The window contains a text input field for 'Название документа' (Document name) with the placeholder text 'Новый документ' (New document). Below this is a section for 'Тип' (Type) with a description: 'Выберите тип документа. Для вставки html-кода, inline-фреймов и flash-объектов (](https://docs.google.com/document/pub?id=1W-6CDFJ3OcOV9J88O-t00yxNep0LHROG_dM4-vyDE9Y&embedded=true)

Рис. 4. Модальное окно витрины документов

6. Примененные технологии

В целях описания ряда преимущественных особенностей разработанной Витрины документов следует упомянуть о примененных технологиях.

Прежде всего в рамках разработки была широко применена технология JAVA. Это позволяет выполнять пользовательские операции такие, например, как перемещение разделов по меню, их добавление или удаление, без переза-

грузки страницы. Изменение размеров области просмотра документов (скрытие/развертывание меню) также реализовано с помощью JAVA.

Модальные окна реализованы на основе популярной библиотеки jQuery. jQuery – библиотека JavaScript, фокусирующаяся на взаимодействии JavaScript и HTML. Библиотека jQuery помогает легко получать доступ к любому элементу DOM (Document Object Model), обращаться к атрибутам и содержимому элементов DOM, манипулировать ими. Также библиотека jQuery предоставляет удобный API по работе с Ajax.

Заключение

Предложенная Витрина документов является недорогим и эффективным программным средством, обеспечивающим решение проблем управления документацией СМК университетов. «Витрина документов» реализована на веб-платформе и функционирует посредством браузера.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9000–2008. Государственный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М., 2008.
2. ГОСТ Р ИСО 9000–2008. Государственный стандарт Российской Федерации Системы менеджмента качества. Требования. – М., 2008.
3. ГОСТ Р ИСО 15489-1–2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Управление документами. Общие требования. – М., 2007.
4. **Крюков, И. Э.** Принципы автоматизации системы менеджмента / И. Э. Крюков, А. Д. Шардин // Качество. Инновации. Образование. – 2005. – № 2. – С. 29–35.
5. **Инмон, Б.** DW 2.0: хранилища данных следующего поколения / Б. Инмон // Открытые системы СУБД. – 2007. – № 5. – С. 21–27.

Суровицкая Галина Владимировна

кандидат технических наук, начальник
отдела планирования и анализа
Управления системой качества,
Пензенский государственный университет

E-mail: gvs_kachestvo@inbox.ru

Surovitskaya Galina Vladimirovna

Candidate of engineering sciences,
head of QMS's department of planning
and analysis, Penza State University

Шитов Денис Вячеславович

ассистент, кафедра математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный университет

E-mail: ShitovDenis@mail.ru

Shitov Denis Vyacheslavovich

Assistant, sub-department of computer
application and software,
Penza State University

Комиссарова Татьяна Борисовна

старший методист института
инновационных технологий обучения,
Пензенский государственный
университет

E-mail: tbkomiss@bk.ru

Komissarova Tatyana Borisovna

Vice-dean of the faculty of innovative
educational technologies,
Penza State University

УДК 681.3

Суровицкая, Г. В.

Программно-сервисные средства управления документацией системы менеджмента качества университета / Г. В. Суровицкая, Д. В. Шитов, Т. Б. Комиссарова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 87–97.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 681.2.088

В. Н. Ашанин

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Аннотация. Проведена систематизация преобразователей информации непрерывно-дискретной системы, характеризующихся гетерогенной структурой информационного сигнала в канале преобразования.

Ключевые слова: средство измерения, преобразователь информации, непрерывно-дискретная система, гетерогенная структура, эмерджентность, фрактальность.

Abstract. The author has systematized the converters of information of an analog-digital system, which are characterized by the heterogeneous structure of the information signal in the channel of conversion.

Key words: measurement means, measuring converter, analog-digital system, heterogeneous structure, emergence, fractal.

Введение

Уровень теории определяется степенью обобщения ее основных положений, которое немыслимо без систематизации. В области современной информационно-измерительной техники это наиболее актуально, поскольку для анализа свойств средства измерения необходима его идентификация и важнейшие классификационные признаки должны быть связаны с особенностями математического описания проектируемого (исследуемого) устройства или его модели.

Последние достижения в области измерительной техники, определяющие основные статические и динамические характеристики средств измерений, неразрывно связаны с цифровыми методами обработки информации. Учитывая, что физические процессы в природе являются непрерывными во времени, известные преимущества обработки информации в цифровом виде предопределили тенденцию преобразования измерительных сигналов в цифровую форму на возможно ранних стадиях процедуры измерения. Именно это определило широкое использование в измерительных устройствах импульсных преобразователей информации (ПИ), структура которых содержит непрерывную $H(p)$, дискретную $H(z)$ части и импульсный элемент (рис. 1). Естественным образом их отнесли к подклассу непрерывно-дискретных систем [1, 2]. Они имеют динамические свойства, существенно отличающиеся от чисто непрерывных и чисто дискретных систем.

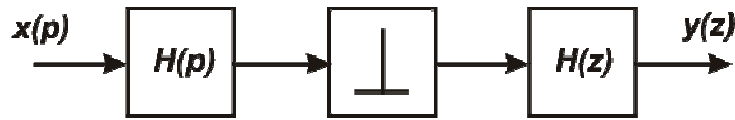


Рис. 1. Эквивалентная функциональная схема преобразователя информации непрерывно-дискретной системы разомкнутой структуры

Важность разработки классификации ПИ непрерывно-дискретной системы обусловлена многочисленностью и уникальностью свойств подкласса подобных импульсных ПИ, что было показано в работах [1, 3].

1. Классификация преобразователей информации непрерывно-дискретной системы

В основу систематизации должны быть положены признаки, связанные с особенностями математического описания проектируемого (исследуемого) устройства или его модели, что необходимо для определения его места в ряду импульсных ПИ. Положим в основу классификации известный принцип дихотомического деления [2], при котором каждому признаку соответствует деление классифицируемых объектов на два подкласса в виде графа (рис. 2).



Рис. 2. Классификация измерительных преобразователей информации непрерывно-дискретной системы

Выделим группу признаков, существенных с точки зрения особенностей непрерывно-дискретного представления измерительной информации в тракте преобразования по виду:

- структуры ПИ;
- математического описания передаточной функции ПФ;
- физической величины – носителя информации;
- представления информации.

В центре классификационного графа преобразователей информации (рис. 2) даны формулировки признаков и названия подклассов ПИ, различаемых по каждому признаку.

Классификационным признаком разделения преобразователей информации на структуры канонического и неканонического вида является применимость принципа **декомпозиции** при анализе и синтезе ПИ непрерывно-дискретной системы.

Сложность использования принципа декомпозиции для ПИ неканонического вида, т.е. разложения структуры на отдельные слабо связанные элементы, порождает **нераздельность** структурно-алгоритмического процесса проектирования и является основной причиной его усложнения [3–5]. Следует отметить, что большинство современных измерительных ПИ непрерывно-дискретной системы имеют замкнутую структуру неканонического вида, характеризуется высокой степенью интеграции и взаимосвязанности структурно-алгоритмических компонентов системы [3, 5, 6].

Для применения эффективных методов цифровой обработки сигналов, которые используются в измерительном канале, требуется высокая линейность функции преобразования ПИ. Отметим, что ПИ неканонического вида потенциально могут обеспечить предельно возможную линейность. Это подтверждается тем, что максимальная линейность передаточной функции (соответствующая 24 двоичным разрядам) достигнута для $\Sigma \Delta$ -АЦП, которые относятся к подклассу ПИ неканонического вида.

Замкнутая структура ПИ непрерывно-дискретной системы неканонического вида представляет собой единое целое и обладает определенной совокупностью свойств, часть из которых имеет системный характер и не сводится к совокупности свойств отдельных элементов системы [3, 5]. Такое свойство систем, называемое **эмерджентностью** (англ. *emergence* – возникновение, появление нового), является основным признаком ПИ неканонического вида.

Конечное время преобразования для ПИ замкнутых структур неканонического вида достигается за счет присущей им **детерминированной** связи между их структурой и алгоритмом преобразования измерительных сигналов [3, 5]. Таким образом, динамические свойства ПИ данного подкласса могут быть целенаправленно улучшены не только за счет отдельных структурных или алгоритмических, но и за счет согласованных структурно-алгоритмических изменений.

ПИ замкнутой структуры неканонического вида имеют свойство **фрактальности** [3, 5]. Оно проявляется в том, что замкнутая структура ПИ представляет собой множества вложенных подобных структур, отличающихся порядком передаточной функции непрерывной части. Это свойство может быть использовано на этапе синтеза ПИ путем последовательного увеличения порядка передаточной функции и алгоритма цифрового фильтра в составе непрерывно-дискретной системы.

Таким образом, математическое описание передаточной функции ПИ неканонического вида замкнутой структуры (рис. 3) качественно сложнее

описания передаточной функции ПИ канонического вида, и, как следствие, при разработке средств измерения на основе ПИ неканонического вида замкнутой структуры возникает целый ряд проблем. Кратко их рассмотрим.

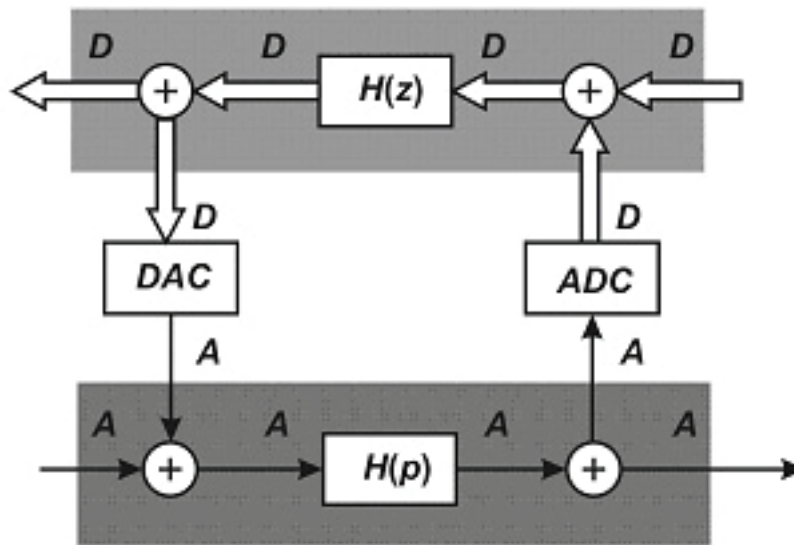


Рис. 3. Обобщенная функциональная схема преобразователя информации непрерывно-дискретной системы замкнутой структуры неканонического вида

Одной из математических проблем является корректное совместное использование процедур непрерывного и дискретного операторных преобразований Лапласа, относящихся к одним и тем же звеньям структуры непрерывно-дискретной системы. Ее решение возможно путем введения дополнительных правил эквивалентных топологических преобразований структур непрерывно-дискретной системы канонического вида, которые обеспечат корректное совместное использование процедур непрерывного и дискретного операторных преобразований Лапласа для класса замкнутых структур непрерывно-дискретной системы неканонического вида.

Существует проблема привязки цифрового выходного кода ПИ замкнутой структуры неканонического вида к временной сетке, которая связана с временной неопределенностью, вызванной наличием итерационного процесса процедур дискретизации и восстановления измерительного сигнала, циркулирующего в замкнутой структуре непрерывно-дискретной системы (см. рис. 3). Сложности возникают при увеличении порядка передаточной функции непрерывной части ПИ, что приводит к пропорциональному увеличению степени систем уравнений, решением которых являются коэффициенты рекурсии. Критерием расчета коэффициентов рекурсии является требование конечности длительности переходного процесса, что дает возможность однозначно привязать результат преобразования ко времени. Задача расчета коэффициентов рекурсии многократно усложняется при наличии операции квантования в замкнутой структуре ПИ, поскольку это переводит линейную систему уравнений в систему нелинейных уравнений.

Практически для решения этой проблемы используются методы линеаризации операции квантования и декомпозиции структуры. Однако их ис-

пользование целесообразно только для замкнутых структур ПИ с многоразрядными АЦП и ЦАП [1, 7].

Проблема корректного описания передаточной функции ПИ со структурой неканонического вида высоких порядков обусловлена эффектом фрактальности. Он проявляется в виде подобия связи между алгоритмом преобразования и структурой для ПИ первого и ПИ высоких порядков. Для корректного описания функции преобразования ПИ со структурой неканонического вида высоких порядков необходимо решение задачи формализации эффекта фрактальности структур.

Однако решение проблемы описания функции преобразования ПИ гетерогенной структуры замкнутого вида не снимает вопроса об оценке погрешности АЦП, связанной с процедурой квантования измеряемого сигнала. Действительно, как показывает опыт разработки АЦП, использующих в канале прямого и обратного преобразования однобитные АЦП и ЦАП [1, 7], анализ флуктуационных шумов квантования в многоразрядном выходном цифровом сигнале является до сих пор до конца нерешенной проблемой. Существующий подход к решению данной проблемы основан на концепции частотного преобразования сигнала в цифровой и аналоговой формах. В качестве математического аппарата используется теория аналоговых и цифровых фильтров, что дает, в общем случае, только качественное описание процесса формирования выходного шума квантования. Описание данного процесса во временной области предполагает рассмотрение структуры непрерывно-дискретной системы неканонического вида для шума квантования как некоторой нелинейной замкнутой структуры, которая описывается нелинейными дифференциально-разностными уравнениями. Подобные системы характеризуются наличием хаотической динамики [1, 7, 8], порождающей сложную детерминированную структуру шума квантования выходного сигнала. По этой причине флуктуационный шум квантования может быть отнесен к случайным сигналам только условно. Для решения задачи совершенствования ПИ этот факт является принципиальным, поскольку потенциально позволяет структурно-алгоритмическими методами решить проблему повышения точности СИ.

По виду физического носителя информации ПИ подразделяются на гетерогенные и гомогенные. Характерной особенностью гетерогенных ПИ является использование в процедуре измерения разнородных физических величин – носителей информации: электрических, магнитных, механических, тепловых и других при измерении значения одной физической величины. Примером подобных современных ПИ служат цифровые акселерометры, выполненные на основе базовых принципов $\Sigma\Delta$ -АЦП по MEMS-технологии [9]. В преобразователях информации гомогенной структуры в процедуре измерения используется одна физическая величина (чаще всего электрическое напряжение).

Для анализа динамических свойств ПИ непрерывно-дискретной системы замкнутой структуры неканонического вида может быть использован метод его представления в виде разомкнутой структуры канонического вида [10, 11], приведенной на рис. 1. Для перехода от замкнутой структуры к разомкнутой необходимо выполнение критерия эквивалентности. Критерием эквивалентности служит условие совпадения реакций непрерывной и эквивалентной дискретной части на единичное входное воздействие в дискрет-

ные моменты времени, совпадающие с шагом дискретизации. Это приводит к появлению гетерогенного (аналого-цифрового) представления информации в сечении канала преобразования ПИ и, как следствие, к смешанной форме записи передаточной функции $H(p, z)$: с использованием операторов Лапласа и z -преобразования [12].

Таким образом, по признаку – виду (форме) информативного сигнала – ПИ непрерывно-дискретной системы могут быть разделены на гетерогенные (неоднородные) и гомогенные (однородные). В гомогенных ПИ информация представлена в аналоговой (непрерывной) или цифровой (дискретной) форме. В гетерогенных ПИ при выполнении процедуры измерения физической величины используются разнородные (аналого-цифровые) виды носителя информации.

Из условия эквивалентности решетчатых функций аналоговой $H(p)$ и дискретной частей $D(p)$ ПИ следует, что произведение $H(p) \cdot D(p)$ коммутативно, т.е. допускает перестановку сомножителей. Из этого, в свою очередь, следует, что при выполнении структурных преобразований возможно перемещение аналоговой части по контуру петли обратной связи. Это открывает возможность формального топологического преобразования структур аналого-цифрового преобразования ПИ в эквивалентные по динамическим характеристикам структуры цифро-аналогового преобразования ПИ. При реализации замкнутой структуры ПИ (рис. 3) эти варианты отличаются точками входа и выхода.

Из вышесказанного следует, что гетерогенность является характерной особенностью всего класса ПИ непрерывно-дискретной системы. К ним следует отнести средства измерения, в которых квантованной является не только входная или выходная величина, но и какая-либо промежуточная величина в тракте преобразования.

В качестве примера рассмотрим классификационную принадлежность вышеупомянутых цифровых акселерометров на основе $\Sigma\Delta$ -АЦП, изготовленных по MEMS-технологии. В соответствии с предлагаемым классификационным графом они относятся к ПИ замкнутой структуры неканонического вида с гетерогенностью по видам физического носителя информации и сигнала. Большинство же выпускаемых $\Sigma\Delta$ -АЦП [7, 11], имея замкнутую структуру неканонического вида, являются гетерогенными только по последнему классификационному признаку – виду информативного сигнала.

Заключение

Таким образом, проведенная классификация позволяет выявить основную причину сложности проектирования ПИ непрерывно-дискретной системы неканонического вида, которая порождается невозможностью использования принципа декомпозиции и, как следствие, обоснования важности исследования этой проблемы и поиска путей развития структурно-алгоритмических методов совершенствования средств измерения с гетерогенной структурой сигнала.

Список литературы

1. **Ашанин, В. Н.** Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ. – 2009. – 214 с.

2. **Шахов, Э. К.** Преобразователи информации: классификация и динамические свойства / Э. К. Шахов // Датчики и системы. – 2000. – № 8. – С. 9–16.
3. **Ашанин, В. Н.** Проблемы теории анализа и синтеза средств измерений гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин // Датчики и системы. – 2011. – № 7. – С. 2–7.
4. **Ашанин, В. Н.** Проблемы 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.
5. **Ашанин, В. Н.** Проблемы теории синтеза измерительных преобразователей гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – Пенза, 2010. – С. 452–454.
6. **Ашанин, В. Н.** Разделение функций – основной принцип совершенствования средств измерения / В. Н. Ашанин, Э. К. Шахов // Датчики и системы. – 2006. – № 7. – С. 2–7.
7. **Schreier, R.** Understanding delta-sigma data converters / R. Schreier, G.C. Temes. – New Jersey, IEEE Press, 2005. – 446 p.
8. **Ашанин, В. Н.** Моделирование $\Sigma\Delta$ -АЦП в режиме хаотических колебаний / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин // Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии : труды XVI Международной конференции. – Гурзуф, 2008. – С. 325–326.
9. **Kajita, T.** A Two-Chip Interface for a MEMS Accelerometer / T. Kajita, Un-Ku Moon, Gabor C. Temes // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – August. – V. 51, № 4. – P. 853–858.
10. **Ашанин, В. Н.** Эквивалентные топологические преобразования структур непрерывно-дискретных систем с заданными динамическими свойствами / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Измерения–2008) : труды Международной научно-технической конференции. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2008. – С. 68–73.
11. **Ашанин, В. Н.** $\Sigma\Delta$ -АЦП: основы теории и проектирование / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 188 с.
12. **Михотин, В. Д.** Методы синтеза весовых функций для эффективной фильтрации измерительных сигналов / В. Д. Михотин, Э. К. Шахов, Б. В. Чувькин // Измерения, контроль, автоматизация. – 1981. – № 5 (39). – С. 3–12.

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 681.2.088

Ашанин, В. Н.

Классификация измерительных преобразователей информации непрерывно-дискретной системы гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 98–104.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ РАЗМАХА ШУМА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Аннотация. Описывается методика, позволяющая определять плотность вероятности размаха шума операционных усилителей по известной спектральной плотности мощности. В основу данного метода положено моделирование шумовых сигналов, представляющих собой сумму белого и фликкер-шума.

Ключевые слова: размах шума, спектральная плотность мощности, белый шум, фликкер-шум, операционный усилитель, плотность вероятности.

Abstract. The article describes a technique of defining the probability density of voltage noise swing in operational amplifiers by the known spectral power density. The basis of this method is the modeling of noise signals, representing the sum of white and flicker noise.

Key words: voltage noise swing, power spectral density, white noise, flicker noise, op amp, probability density.

Введение

Одним из шумовых параметров операционных усилителей (ОУ), подлежащих измерению согласно требованиям ГОСТ 23089.12–86, является размах шума [1]. Измерение данного параметра заключается в определении разности между максимальным и минимальным значениями напряжения шума, фильтрованного в полосе частот от 0,1 до 10 Гц.

Измерение всех шумовых параметров, определяемых названным ГОСТ, включая размах шума, реализовано с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК), описанного в [2]. В данном АПК расчет всех параметров осуществляется на основе обработки оцифрованного шумового сигнала. При реализации метода измерения размаха шума возникает необходимость записи шумового сигнала в течение 10 с, в то время как для определения остальных параметров достаточно записи сигнала продолжительностью менее 1 с. Таким образом, измерение размаха шума существенно увеличивает общую продолжительность эксперимента по определению всех шумовых параметров ОУ.

Поскольку известно, что шумы ОУ по своему спектральному составу являются суммой белого и фликкер-шума [3], то, рассчитав плотности вероятности размаха шума для различных соотношений этих шумов, можно будет найти зависимость плотности вероятности размаха шума от параметров спектра шума ОУ. Это позволит заменить измерение размаха шума на его расчет по параметрам спектра.

1. Расчет плотности вероятности размаха шума

Плотность вероятности размаха шума $\Delta x = x_{\max} - x_{\min}$ можно представить как интеграл по переменной $x_{\min}$ или $x_{\max}$ плотности вероятности того, что шум не превышает значения $x_{\max}$ и равен этому значению хотя бы в одной точке, и не принимает значений менее $x_{\min}$, и равен $x_{\min}$ хотя бы в одной точке.

Если случайный процесс (СП) является некоррелированным и дискретным во времени, то описанная плотность вероятности может быть определена следующим образом. Вероятность того, что СП не выходит за пределы отрезка $[x_{\min}, x_{\max}]$ в некоторой точке t_1 , следующая:

$$P_1(x_{\min}, x_{\max}) = F_1(x_{\max}) - F_1(x_{\min}), \quad (1)$$

где F_1 – функция распределения СП.

Так как все значения рассматриваемого СП независимы, то вероятность того, что значения СП лежат в пределах отрезка $[x_{\min}, x_{\max}]$ во всех точках $t_1, t_2 \dots t_n$, определится по правилу умножения вероятностей для независимых событий:

$$P_2(x_{\min}, x_{\max}) = (F_1(x_{\max}) - F_1(x_{\min}))^n, \quad (2)$$

где n – число точек СП.

Вероятность того, что значения СП не выходят за пределы отрезка $[x_{\min}, x_{\max} + \delta x]$ и хотя бы одно значение находится в пределах отрезка $[x_{\max}, x_{\max} + \delta x]$, следующая:

$$P_3(x_{\min}, x_{\max} + \delta x) = (F_1(x_{\max} + \delta x) - F_1(x_{\min}))^n - (F_1(x_{\max}) - F_1(x_{\min}))^n. \quad (3)$$

Если поделить выражение (3) на $\delta x \rightarrow 0$, то будет получена производная вероятности (2) по переменной $x_{\max}$:

$$w_4(x_{\min}, x_{\max}) = \frac{d(P_2(x_{\min}, x_{\max}))}{dx_{\max}} = n(F_1(x_{\max}) - F_1(x_{\min}))^{n-1} w_1(x_{\max}), \quad (4)$$

где $w_4(x_{\min}, x_{\max})$ – плотность вероятности того, что значения СП не выходят за пределы отрезка $[x_{\min}, x_{\max}]$, и СП принимает значение $x_{\max}$ хотя бы в одной точке; $w_1(x)$ – плотность вероятности рассматриваемого СП.

Если аналогичным образом определить производную от плотности вероятности (4) по переменной $x_{\min}$, то будет получена плотность вероятности того, что значения СП не выходят за пределы отрезка $[x_{\min}, x_{\max}]$, и СП принимает значения $x_{\max}$ и $x_{\min}$ хотя бы один раз:

$$\begin{aligned} w_5(x_{\min}, x_{\max}) &= \frac{d^2(P_2(x_{\min}, x_{\max}))}{dx_{\max} dx_{\min}} = \\ &= n(n-1)(F_1(x_{\max}) - F_1(x_{\min}))^{n-2} w_1(x_{\max}) w_1(x_{\min}). \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда плотность вероятности разности $\Delta x = x_{\max} - x_{\min}$ определится по формуле

$$w_{\Delta}(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} n(n-1)(F_1(x_{\min} + \Delta x) - F_1(x_{\min}))^{n-2} \times$$

$$\times w_1(x_{\min} + \Delta x) w_1(x_{\min}) dx_{\min}. \quad (6)$$

На рис. 1 показана плотность вероятности размаха шума, рассчитанная по полученной формуле для нормального СП с числом точек $n = 200$, дисперсией, равной единице, и нулевым средним значением.

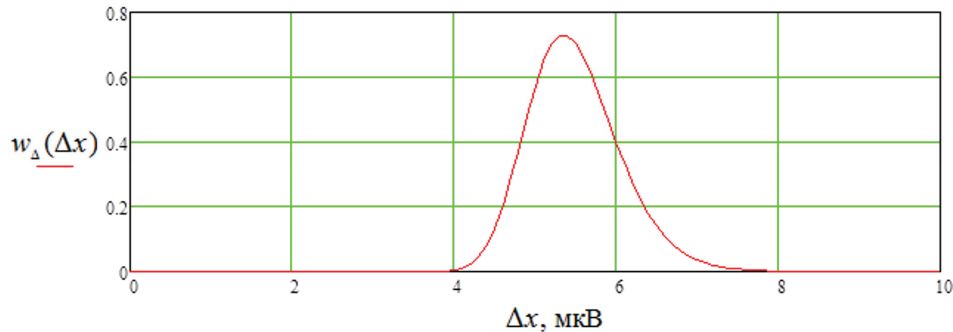


Рис. 1. Плотность вероятности размаха шума

Если СП не является белым шумом, то при расчете плотности вероятности размаха шума необходимо будет выполнять действия с многомерными функциями распределения вплоть до n -мерных, что делает расчет невозможным.

Для определения плотности вероятности размаха небелого шума можно предложить методику, основанную на многократном моделировании шума с заданной спектральной плотностью мощности (СПМ). Для этого нужно смоделировать некоторый белый шум и отфильтровать его таким образом, чтобы получить СП с требуемой СПМ, а затем определить размах полученного сигнала. После многократных повторений описанных действий можно будет определить плотность вероятности размаха шума для СП с заданной СПМ.

Повторяя данные действия для спектров с различными параметрами, можно будет определить зависимость плотности вероятности размаха шума от параметров спектра.

Перед тем как перейти к моделированию, нужно рассчитать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров, необходимые для формирования СП с заданными СПМ.

2. Расчет частотных характеристик фильтров

Получить СП с заданной СПМ можно следующим образом. Сформировать белый шум, выполнить преобразование Фурье, умножить результат на функцию АЧХ, соответствующую определенной СПМ (в результате будет получено преобразование Фурье формируемого сигнала), выполнить обратное преобразование Фурье:

$$s(t) = F^{-1}(F(s_{\text{БШ}}(t))K(f)), \quad (7)$$

где F , F^{-1} – операторы прямого и обратного преобразования Фурье соответственно; $s(t)$ – сигнал, который требуется смоделировать; $s_{\text{БШ}}(t)$ – белый шум, используемый для моделирования; $K(f)$ – функция АЧХ, соответствующая заданной СПМ.

Теперь необходимо определить, какая АЧХ соответствует заданной СПМ. СПМ шумов ОУ определяется формулой

$$S(f) = C + \frac{K}{f^\gamma}, \quad (8)$$

где C – СПМ белого шума; K – коэффициент фликкер-шума; γ – показатель степени фликкер-шума.

СПМ белого шума, используемого для моделирования, может быть преобразована к СПМ (8) с помощью фильтра с функцией АЧХ, равной квадратному корню данной СПМ:

$$S(f) = S_{\text{БШ}}(f)K(f), \quad (9)$$

$$K(f) = \sqrt{C + \frac{K}{f^\gamma}}. \quad (10)$$

где $S(f)$ – спектр сигнала, который требуется смоделировать; $S_{\text{БШ}}(f)$ – спектр белого шума.

Следует также учесть, что моделируемый сигнал является ограниченным по времени. Это означает, что в частотной области он является свернутым с частотной характеристикой прямоугольного окна:

$$S(f) = (S_{\text{БШ}}(f)K(f)) * O(f), \quad (11)$$

$$O(f) = T \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T}, \quad (12)$$

где $O(f)$ – частотная характеристика прямоугольного окна; T – длительность сигнала.

Прямой расчет по формуле (11) невозможен, так как в ней используется непрерывный спектр белого шума, поэтому эту формулу необходимо преобразовать.

Любые точки в спектре белого шума $S_{\text{БШ}}(f)$ являются некоррелированными, следовательно, произведение $S_{\text{БШ}}(f)K(f)$ также обладает некоррелированными точками. После выполнения свертки с частотной характеристикой прямоугольного окна все точки спектра становятся коррелированными, за исключением точек, шаг между которыми равен величине, обратной длительности сигнала.

Для того чтобы сделать расчет по формуле (11) возможным, нужно выполнить следующую замену:

$$S(f_0) = (S_{\text{БШ}}(f)K(f)) * O(f) = \int S_{\text{БШ}}(f)K(f)O(f - f_0)df \quad (13)$$

на

$$S(f_0) = S'_{\text{БШ}}(f_0) \int K(f)O(f - f_0)df, \quad (14)$$

где $S'_{\text{БШ}}(f_0)$ – спектр некоторого СП.

Так как спектр (11) в определенных точках является некоррелированным, то и спектр $S'_{\text{БШ}}(f_0)$ будет некоррелированным в этих точках.

Если выполнить дискретизацию спектра (14) с шагом, равным обратной величине длительности сигнала, то будет получено произведение дискретного спектра белого шума и свертки функции АЧХ фильтра с частотной характеристикой прямоугольного окна:

$$S(f_0) = S_{\text{БШ}}(f_0)(K(f) * O(f)). \quad (15)$$

Чтобы уменьшить число переменных, от которых зависит форма спектра, определяемого по формуле (15), удобно разделить его на $\sqrt{K}$:

$$S(f_0) = \frac{S_{\text{БШ}}(f_0) \left(\sqrt{C + \frac{K}{f^\gamma}} * O(f) \right)}{\sqrt{K}} = S_{\text{БШ}}(f_0) \left(\sqrt{\frac{C}{K} + \frac{1}{f^\gamma}} * O(f) \right). \quad (16)$$

Тогда необходимо будет определить спектры только в зависимости от отношения $\frac{C}{K}$ и степени γ .

Как правило, фликкер-шум в полосе частот до 10 Гц значительно преобладает над белым шумом, поэтому рассматриваться будут только те спектры, у которых

$$\frac{C}{K} \leq 0,5. \quad (17)$$

Моделирование шумов произведено в два этапа. На первом этапе численными методами была рассчитана свертка в формуле (16) для различных значений $\frac{C}{K}$ и γ . Расчет выполнялся для значений $\frac{C}{K}$ от 0 до 0,5 с шагом 0,0025 и значений γ от 0 до 1,9 с шагом 0,1. На рис. 2 показаны примеры полученных результатов свертки (в данном случае $\gamma = 1$, $\frac{C}{K} = 0; 0,25; 0,5$).

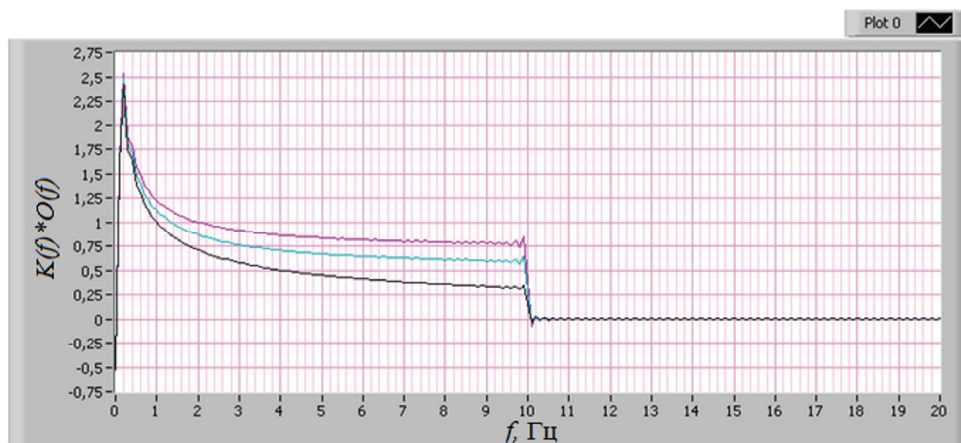


Рис. 2. Примеры результатов расчетов свертки

Используемый шаг по частоте равен 0,1 Гц, что соответствует минимальной длительности сигнала 10 с.

На втором этапе путем умножения рассчитанных функций АЧХ на спектр белого шума получены сигналы, моделирующие шумы ОУ.

3. Определение плотности вероятности размаха шума с помощью моделирования

Для расчета по формуле (16) использовался результат преобразования Фурье нормального белого шума с дисперсией, равной единице. Моделирование для каждого значения $\frac{C}{K}$ и γ выполнялось 25000 раз. Для каждого случая рассчитаны значения размаха шума и представлены в виде гистограммы. На рис. 3 представлен пример гистограммы, полученной в результате моделирования шума с параметрами $\gamma = 1$, $\frac{C}{K} = 0,25$.

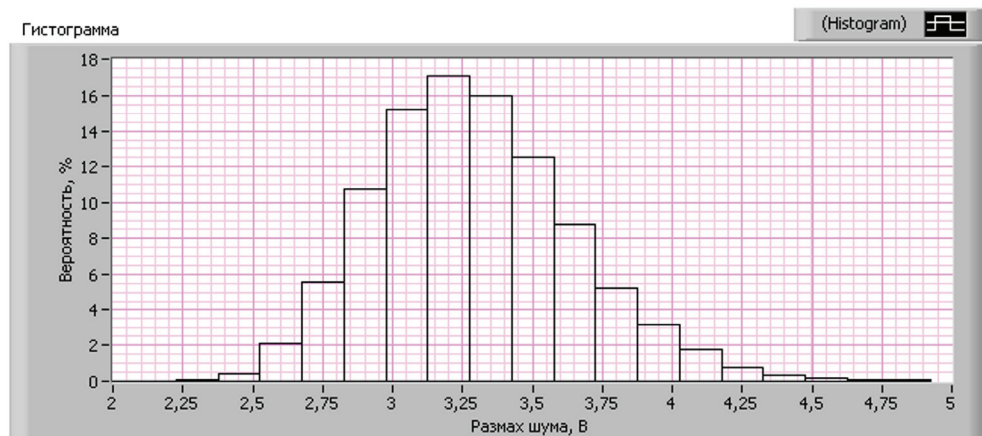


Рис. 3. Гистограмма размаха шума для СП с параметрами $\gamma = 1$, $\frac{C}{K} = 0,25$

Все полученные гистограммы незначительно отличаются друг от друга по форме, поэтому плотности вероятности для различных спектров могут быть приблизительно описаны с помощью плотности вероятности (5).

Так как плотность вероятности для любых значений γ и $\frac{C}{K}$ принимается одинаковой, то для ее описания достаточно знать лишь дисперсию и среднее значение. По результатам моделирования получены зависимости дисперсии и квадрата среднего значения от параметров γ и $\frac{C}{K}$ (рис. 4). На полученных графиках ось с размерностью в 200 точек соответствует параметру $\frac{C}{K}$, ось с размерностью 20 соответствует параметру γ .

Полученные зависимости аппроксимированы с помощью полиномов третьего порядка.

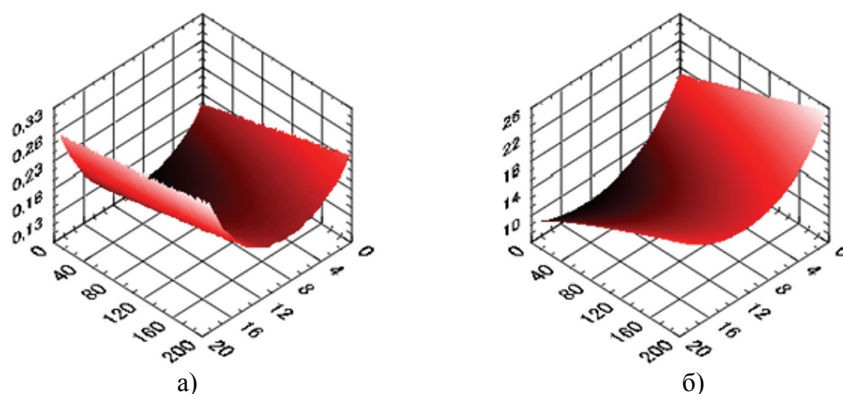


Рис. 4. Зависимости дисперсии (а) и квадрата среднего значения (б) от параметров спектра

Аппроксимация зависимости дисперсии D представлена формулами (18)–(22), а квадрата среднего значения m – формулами (23)–(27):

$$D = a_0 + a_1 \cdot \frac{C}{K} + a_2 \left(\frac{C}{K} \right)^2 + a_3 \left(\frac{C}{K} \right)^3, \quad (18)$$

$$a_0 = b_{00} + b_{01} \cdot \gamma + b_{02} \cdot \gamma^2 + b_{03} \cdot \gamma^3, \quad (19)$$

$$a_1 = b_{10} + b_{11} \cdot \gamma + b_{12} \cdot \gamma^2 + b_{13} \cdot \gamma^3, \quad (20)$$

$$a_2 = b_{20} + b_{21} \cdot \gamma + b_{22} \cdot \gamma^2 + b_{23} \cdot \gamma^3, \quad (21)$$

$$a_3 = b_{30} + b_{31} \cdot \gamma + b_{32} \cdot \gamma^2 + b_{33} \cdot \gamma^3, \quad (22)$$

$$m^2 = p_0 + p_1 \cdot \frac{C}{K} + p_2 \left(\frac{C}{K} \right)^2 + p_3 \left(\frac{C}{K} \right)^3, \quad (23)$$

$$p_0 = q_{00} + q_{01} \cdot \gamma + q_{02} \cdot \gamma^2 + q_{03} \cdot \gamma^3, \quad (24)$$

$$p_1 = q_{10} + q_{11} \cdot \gamma + q_{12} \cdot \gamma^2 + q_{13} \cdot \gamma^3, \quad (25)$$

$$p_2 = q_{20} + q_{21} \cdot \gamma + q_{22} \cdot \gamma^2 + q_{23} \cdot \gamma^3, \quad (26)$$

$$p_3 = q_{30} + q_{31} \cdot \gamma + q_{32} \cdot \gamma^2 + q_{33} \cdot \gamma^3. \quad (27)$$

В табл. 1 и 2 приведены коэффициенты $b_{00} \dots b_{33}$ и $q_{00} \dots q_{33}$ (строки – первый индекс, столбцы – второй индекс).

Таблица 1

Коэффициенты $b_{00} \dots b_{33}$

b	0	1	2	3
0	1,590119E–1	–2,187639E–2	2,333247E–3	–1,150139E–4
1	5,213404E–4	–4,520581E–5	4,993642E–6	–3,056311E–7
2	–3,496642E–6	9,412096E–7	–6,569399E–8	–2,525339E–11
3	3,757002E–8	–6,217924E–9	–3,254795E–10	9,351411E–11

Коэффициенты $q_{00} \dots q_{33}$

q	0	1	2	3
0	1,689842E+1	-2,273311E+0	1,902133E-1	-7,805933E-3
1	4,285473E-2	4,987299E-5	-2,409173E-5	6,159264E-6
2	-2,473689E-5	-6,120354E-7	9,869314E-7	-1,191552E-7
3	3,920040E-7	-6,620069E-9	-1,324688E-8	1,518473E-9

Максимальные значения относительной погрешности аппроксимации для дисперсии и квадрата среднего значения равны 3,62 и 0,62 % соответственно, что находится на уровне флуктуаций расчетных значений.

4. Пример расчета плотности вероятности размаха шума

С помощью АПК [2] был записан шум ОУ 544УД2А продолжительностью 10 с. На рис. 5 показана временная диаграмма данного шума, фильтрованного в полосе частот от 0,1 до 10 Гц, и его СПМ без фильтрации.

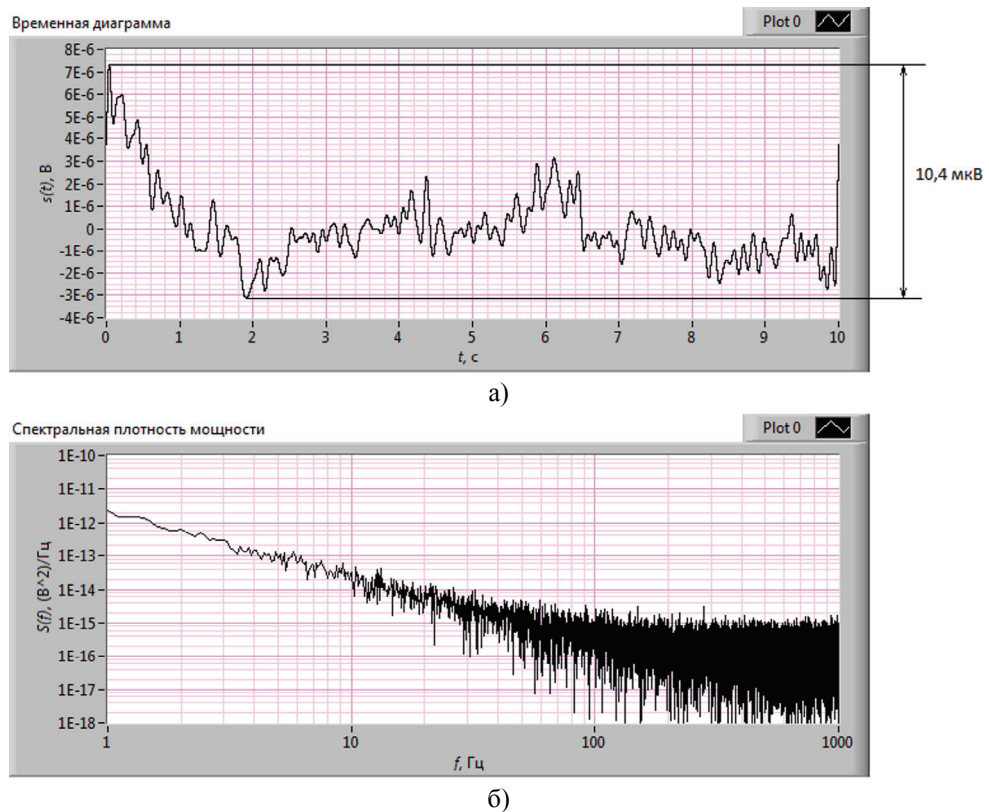


Рис. 5. Шум ОУ 544УД2А. Временная диаграмма шума, фильтрованного в полосе от 0,1 до 10 Гц (а) и СПМ (б)

После определения параметров СПМ данного шума с помощью формул (18)–(27) были рассчитаны среднее значение и дисперсия плотности вероятности размаха шума, которые составили 9,92 и 1,16 мкВ соответственно, что хорошо согласуется с экспериментальным результатом (10,4 мкВ). На рис. 6 показана полученная плотность вероятности.

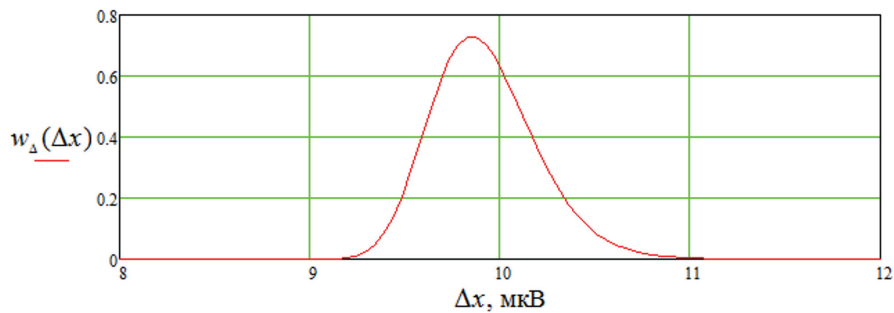


Рис. 6. Плотность вероятности размаха шума для ОУ 544УД2А

Заключение

Разработана методика, позволяющая определять вероятность появления того или иного значения размаха шума ОУ в зависимости от СПМ этого шума.

Чтобы определить плотность вероятности размаха шума для СП с известной СПМ, нужно найти параметры γ и $\frac{C}{K}$ этой СПМ и подставить их в формулы (18)–(27). В результате будут получены значения математического ожидания и дисперсии плотности вероятности размаха шума, форма которой определяется формулой (5).

Разработанная методика позволяет значительно сократить время проведения эксперимента по определению шумовых параметров ОУ. Применяется для определения размаха шума в АПК, описанном в [2].

Список литературы

1. **Пучков, М. В.** Измерение шумовых параметров операционных усилителей с применением аппаратно-программных средств National Instruments / М. В. Пучков, А. В. Светлов, В. С. Чайковский // Надежность и качество : труды Международного симпозиума : в 2 т. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – Т. 1. – С. 355, 356.
2. **Чайковский, В. С.** Измеритель шумовых параметров операционных усилителей / В. С. Чайковский // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : труды Международной научно-технической конференции. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2008. – С. 160–163.
3. Noise analysis in operational amplifier circuit. Application report. Texas instruments incorporated, 2007. – Режим доступа: focus.ti.com/lit/an/slva043b/slva043b.pdf

Чайковский Виталий Сергеевич

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Tchaykovsky Vitaliy Sergeevich

Post graduate student,
Penza State University

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Svetlov Anatoly Vilyevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio
engineering and radio-electronic systems,
Penza State University

УДК 621.317.18

Чайковский, В. С.

Методика определения плотности вероятности размаха шума операционных усилителей / В. С. Чайковский, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 105–114.

СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОГО КОМПЛЕКСНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА МНОГОПОЛЮСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ТИПА «ТРЕУГОЛЬНИК»

Аннотация. Предложены амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый способы измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника, расположенного в многополюсной электрической цепи типа «треугольник», без нарушения целостности исследуемой многополюсной электрической цепи на основе алгоритмического метода измерения путем изменения конфигурации измерительной цепи. Рассмотрен вариант схемной реализации алгоритмического метода измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника, исключающего методическую погрешность измерения.

Ключевые слова: пассивный комплексный двухполюсник, методическая погрешность, амплитудный способ, фазовый способ, амплитудно-фазовый способ.

Abstract. The authors suggest the amplitude, phase, amplitude-phase methods of improving accuracy of parameters measurement of a passive complex dipole, located in a multi-pole triangle-type electrical circuit, without violating the integrity of the investigated multi-pole electrical circuit, based on the algorithmic method of measurement, by changing the configuration of the measuring circuit. The article reviews a variant of schematic realization of the algorithmic method of parameters measurement of passive complex dipole, forming one of the branches of the multi-pole electrical circuit.

Key words: passive complex dipole, method error, amplitude method, phase method, amplitude-phase method.

Введение

Все сложные многополюсные электрические цепи (МЭЦ) можно привести к трехполюсным цепям двух типов: треугольник и звезда. Представление МЭЦ в виде замкнутой структуры типа «треугольник», содержащей пассивные комплексные двухполюсники (ПКД), применяется в радиоэлектронике, электросвязи, электрохимии, медицине, биологии и других областях науки и техники. МЭЦ, по сравнению с двухполюсной, более точно отражает модель объекта исследования, так как учитывает большее число факторов, влияющих на результат измерения.

1. Традиционные способы измерения параметров ПКД в МЭЦ типа «треугольник»

Параметры ПКД в МЭЦ типа «треугольник» определяются одним из следующих способов:

а) на основе прямых измерений – путем сравнения значений параметров двухполюсников измеряемой МЭЦ с соответствующими значениями параметров образцовых двухполюсников образцовой МЭЦ, в момент равновесия;

б) на основе совокупных измерений – путем измерения входных проводимостей МЭЦ между двумя полюсами при различных режимах остальных полюсов и последующего решения уравнений;

в) на основе косвенных измерений – путем измерения токов и напряжений на зажимах МЭЦ и последующих расчетов.

Для определения параметров (модуля, активной и реактивной составляющих проводимости) отдельно взятого ПКД, расположенного в МЭЦ типа «треугольник», традиционно применяют метод расчленения данной МЭЦ без ее физического разрыва путем создания определенного электрического режима в исследуемой ветви МЭЦ, при котором разность потенциалов на ее полюсах или ток в ней определяются только параметрами этой ветви [1, 2]. Далее согласно математической модели измерительной цепи (ИЦ) записывается система уравнений, каждое из которых содержит одно неизвестное. Решая систему методом исключений, получают значения параметров исследуемой ветви.

При измерении параметров ПКД, образующего одну из ветвей рассматриваемой многополюсной цепи, основная проблема заключается в устранении влияния на результат измерения ПКД, расположенных в других ветвях МЭЦ, ненулевого значения входной комплексной проводимости согласующего блока и конечного значения внутренней комплексной проводимости источника тока.

2. Способы повышения точности измерения параметров ПКД в МЭЦ типа «треугольник»

Рассмотрим возможность измерения параметров ПКД, расположенного в МЭЦ типа «треугольник», на базе косвенных и совокупных измерений на основе алгоритма изменения конфигурации измерительной цепи. Рассмотрим измерение модуля и составляющих исследуемой комплексной проводимости двухэлементного двухполюсника однородной и неоднородной по характеру проводимости образцовому двухполюснику (рис. 1).

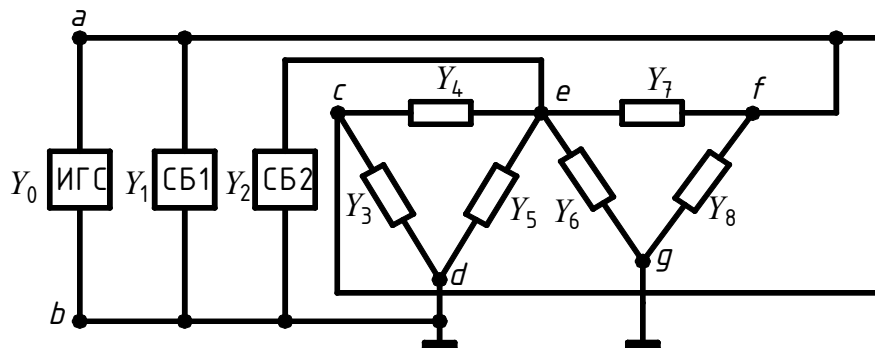


Рис. 1. Цепь измерения составляющих исследуемой комплексной проводимости двухэлементного двухполюсника Y_4 однородной и неоднородной по характеру проводимости образцового двухполюсника Y_7 , расположенного в многополюсной электрической цепи типа «треугольник» Y_3 , Y_4 , Y_5

На рис. 1 обозначены: источник гармонического сигнала (ИГС) с внутренней комплексной проводимостью Y_0 ; согласующие блоки с входной комплексной проводимостью Y_1 (СБ1) и с входной комплексной проводимостью Y_2 (СБ2); ПКД исследуемой МЭЦ Y_3 , эквивалентный комплексной проводи-

мости первой ветви исследуемой МЭЦ, исследуемый ПКД $Y_4 = g_x + jb_x$ МЭЦ, ПКД Y_5 МЭЦ, эквивалентный комплексной проводимости третьей ветви исследуемой МЭЦ, ПКД Y_6 МЭЦ, образцовый двухполюсник $Y_7 = g_7$, ПКД Y_8 МЭЦ.

Проведем исследование системной функции измерительной цепи на базе формулы Мезона [3], которая отражает теорию графов.

Определим элементы формулы Мезона применительно к измерительной цепи. Выражение для напряжений с выходов СБ1 и СБ2 в любом из тактов изменения конфигурации измерительной цепи запишем в виде

$$\underline{U}_{ij} = n_i \underline{I} T_{ij} = \frac{n_i \underline{I}}{\Delta_j} \sum_{k=1}^m P_{ijk} \Delta_{ijk}, \quad (1)$$

где $\underline{U}_{ij}$ – напряжение с выхода i -го СБ в j -м такте измерения; n_i – коэффициент передачи напряжения i -го СБ в любом из тактов измерения; $\underline{I}$ – ток ИГС; T_{ij} – системная функция измерительной цепи, которая определяется отношением величины напряжения, измеряемой i -м СБ в j -м такте измерения, к величине тока ИГС; P_{ijk} – величина k -го пути передачи через i -й СБ в j -м такте измерения; Δ_{ijk} – алгебраическое дополнение соответствующего пути передачи; m – число возможных путей передачи через i -й СБ в j -м такте измерения; Δ_j – определитель измерительной цепи в j -м такте измерения [4].

Рассмотрим ненаправленный граф измерительной цепи, изображенной на рис. 1, и алгебраическое дополнение пути передачи через СБ1 (рис. 2).

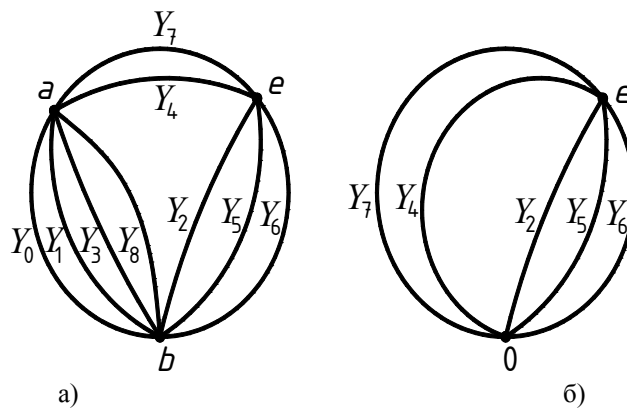


Рис. 2. Ненаправленный граф измерительной цепи (а) и алгебраическое дополнение пути передачи Δ_{ijk} через СБ1 (б)

Выражение для напряжения $\underline{U}_{da} = \underline{U}_{ba}$ с выхода СБ1 имеет вид

$$\underline{U}_{11} = \underline{U}_{ba} n_1 = n_1 \underline{I} \frac{Y_2 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7}{\Delta_1}, \quad (2)$$

где n_1 – значение коэффициента передачи СБ1.

Выражение для напряжения $\underline{U}_{ge}$ с выхода СБ2 имеет вид

$$\underline{U}_{21} = \underline{U}_{ge} n_2 = n_2 I \frac{Y_4 + Y_7}{\Delta_1}, \quad (3)$$

где n_2 – значение коэффициента передачи СБ2.

При этом результат измерений можно записать в виде

$$\frac{U_{21}}{U_{11}} = \frac{n_2 (Y_4 + Y_7)}{n_1 (Y_2 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7)}. \quad (4)$$

Очевидно, рассмотренному варианту измерения модуля ПКД присуща методическая погрешность

$$\delta = 1 - \frac{Y_7 (U_{11} n_2 - U_{21} n_1) - U_{21} n_1 (Y_2 + Y_5 + Y_6)}{Y_4 (U_{21} n_1 - U_{11} n_2)}, \quad (5)$$

обусловленная входной комплексной проводимостью Y_2 СБ2, проводимостью третьего плеча Y_5 исследуемой МЭЦ и неравенством коэффициентов n_1 и n_2 передачи СБ1 и СБ2.

При восстановлении измерительной цепи из деформированной по числителю системной функции (рис. 2,б) возможны два дополнительных варианта измерительных цепей, ненаправленные графы которых изображены на рис. 3.

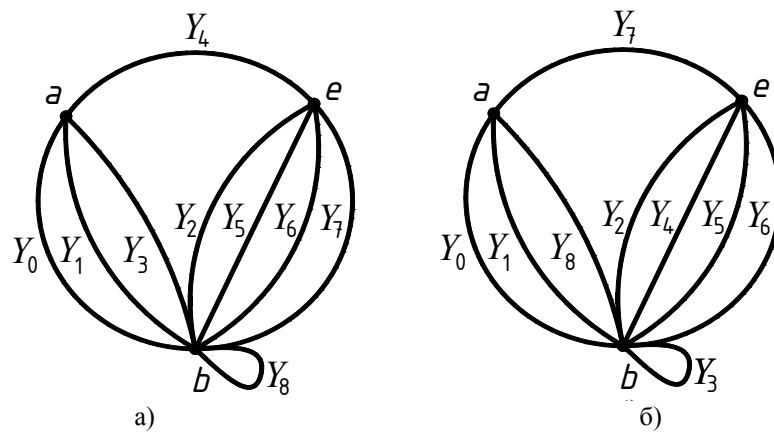


Рис. 3. Ненаправленные графы восстановленных из деформированной по числителю системной функции измерительных цепей

Определители полученных измерительных цепей не совпадают между собой и не совпадают с определителем исходной измерительной цепи, а алгебраическое дополнение пути передачи через СБ1 одно и то же.

Выражение для напряжения $\underline{U}_{da} = \underline{U}_{ba}$ измерительной цепи, ненаправленный граф которой изображен на рис. 3,а, с выхода СБ1 имеет вид

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{ba} n_1 = n_1 I \frac{Y_2 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7}{\Delta_2}. \quad (6)$$

Выражение для напряжения $\underline{U}_{dc} = \underline{U}_{ef}$ измерительной цепи, ненаправленный граф которой изображен на рис. 3,а, с выхода СБ2 имеет вид

$$\underline{U}_{22} = \underline{U}_{ef} n_2 = n_2 I \frac{Y_4}{\Delta_2}. \quad (7)$$

При этом результат измерений можно записать в виде

$$\frac{U_{22}}{U_{12}} = \frac{n_2 Y_4}{n_1 (Y_2 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7)}. \quad (8)$$

Выражение для методической погрешности имеет вид

$$\delta = 1 - \frac{U_{22} n_1 (Y_2 + Y_5 + Y_6 + Y_7)}{Y_4 (U_{12} n_2 - U_{22} n_1)}. \quad (9)$$

Выражение для напряжения $\underline{U}_{gf} = \underline{U}_{ba}$ для измерительной цепи, ненаправленный граф которой изображен на рис. 3,б, с выхода СБ1 имеет вид

$$\underline{U}_{13} = \underline{U}_{ba} n_1 = n_1 I \frac{Y_2 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7}{\Delta_3}. \quad (10)$$

Выражение для напряжения $\underline{U}_{de} = \underline{U}_{ce}$ для измерительной цепи, ненаправленный граф которой изображен на рис. 3,б, с выхода СБ2 имеет вид

$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_{ce} n_2 = n_2 I \frac{Y_7}{\Delta_3}. \quad (11)$$

При этом результат измерений можно записать в виде

$$\frac{U_{23}}{U_{13}} = \frac{n_2 Y_7}{n_1 (Y_2 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7)}. \quad (12)$$

Выражение для методической погрешности имеет вид

$$\delta = 1 - \frac{Y_7 U_{13} n_2 - U_{23} n_1 (Y_2 + Y_5 + Y_6 + Y_7)}{Y_4 U_{23} n_1}. \quad (13)$$

Рассмотрим возможность исключения методической погрешности измерения параметров ПКД, расположенного в МЭЦ типа «треугольник».

2.1. Амплитудный способ

Амплитудный способ измерения параметров комплексного двухэлементного двухполюсника, расположенного в трехполюсной электрической цепи типа «треугольник», реализуется на основе измерения напряжения на выходах согласующих блоков в каждом из трех тактов изменения конфигурации ИЦ.

Используя значения модулей напряжений $\underline{U}_{ij}$ в выражениях (2), (3), (6), (7), (10), (11), получим

$$\frac{U_{21} \cdot U_{13}}{U_{11} \cdot U_{23}} = \frac{Y_4 + Y_7}{Y_7} = \frac{\sqrt{(g_x + g_7)^2 + b_x^2}}{g_7}; \quad (14)$$

$$\frac{U_{22} \cdot U_{13}}{U_{12} \cdot U_{23}} = \frac{Y_4}{Y_7} = \frac{\sqrt{g_x^2 + b_x^2}}{g_7}. \quad (15)$$

Возведем в квадрат левые и правые части уравнений (14) и (15):

$$\frac{U_{21}^2 \cdot U_{13}^2}{U_{11}^2 \cdot U_{23}^2} = \frac{g_x^2 + 2g_x g_7 + g_7^2 + b_x^2}{g_7^2}; \quad (16)$$

$$\frac{U_{22}^2 \cdot U_{13}^2}{U_{12}^2 \cdot U_{23}^2} = \frac{g_x^2 + b_x^2}{g_7^2}. \quad (17)$$

Вычтем из уравнения (16) уравнение (17). Получим отсчет по составляющей исследуемого ПКД Y_4 однородной по характеру проводимости образцовому ПКД Y_7 :

$$\frac{g_x}{g_7} = \frac{U_{21}^2 U_{13}^2 U_{12}^2 - U_{12}^2 U_{13}^2 U_{11}^2 - U_{11}^2 U_{12}^2 U_{23}^2}{2U_{11}^2 U_{12}^2 U_{23}^2}. \quad (18)$$

На основании уравнений (17) и (18) получим отсчет по составляющей исследуемого ПКД Y_4 , неоднородной по характеру проводимости образцовому ПКД Y_7 :

$$\frac{b_x}{g_7} = \sqrt{\frac{U_{22}^2 U_{13}^2}{U_{12}^2 U_{23}^2} - \left(\frac{U_{21}^2 U_{13}^2 U_{12}^2 - U_{22}^2 U_{13}^2 U_{11}^2 - U_{11}^2 U_{12}^2 U_{23}^2}{2U_{11}^2 U_{12}^2 U_{23}^2} \right)^2}. \quad (19)$$

Таким образом, устраняется влияние на результат измерения исследуемого ПКД, ПКД, расположенных в других ветвях исследуемой МЭЦ, ненулевого значения входной комплексной проводимости согласующих блоков и конечного значения внутренней комплексной проводимости источника тока [5].

Анализ ненаправленных графов исследуемой и вновь синтезируемых измерительных цепей позволяет сделать вывод, что алгебраическое дополнение пути передачи Δ_{ijk} через СБ1 должно быть одинаково для исходной и вновь синтезируемых ИЦ, т.е. оно должно содержать любую сумму проводимостей одних и тех же двухполюсников. Алгебраические дополнения пути передачи Δ_{ijk} через СБ2 должны содержать исследуемый двухполюсник Y_4 или образцовый двухполюсник Y_7 , или их сумму $Y_4 + Y_7$.

2.2. Фазовый способ

Фазовый способ измерения параметров комплексного нерезонансного двухэлементного двухполюсника, расположенного в трехполюсной электри-

ческой цепи типа «треугольник», реализуется на основе трех тактов изменения конфигурации ИЦ.

Фазовый сдвиг напряжения $\underline{U}_{21}$ относительно напряжения $\underline{U}_{11}$ равен Ψ_1 , фазовый сдвиг напряжения $\underline{U}_{22}$ относительно напряжения $\underline{U}_{12}$ равен Ψ_2 , фазовый сдвиг напряжения $\underline{U}_{23}$ относительно напряжения $\underline{U}_{13}$ равен Ψ_3 . Выразим эти фазовые сдвиги через параметры исследуемого двухполюсника, расположенного в МЭЦ:

$$\Psi_2 - \Psi_1 = \arctg \frac{b_x g_7}{g_x (g_x + g_7) + b_x^2}; \quad (20)$$

$$\Psi_2 - \Psi_3 = \arctg \frac{b_x}{g_x}; \quad (21)$$

$$\Psi_1 - \Psi_3 = \arctg \frac{b_x}{g_x + g_7}. \quad (22)$$

На основании (20)–(22) получим

$$\cos(\Psi_2 - \Psi_3) = \frac{g_x}{\sqrt{g_x^2 + b_x^2}}; \quad (23)$$

$$\sin(\Psi_2 - \Psi_3) = \frac{b_x}{\sqrt{g_x^2 + b_x^2}}; \quad (24)$$

$$\sin(\Psi_1 - \Psi_3) = \frac{b_x}{\sqrt{(g_x + g_7)^2 + b_x^2}}; \quad (25)$$

$$\sin(\Psi_2 - \Psi_1) = \frac{b_x g_7}{\sqrt{(g_x^2 + g_7^2) \cdot [(g_x + g_7)^2 + b_x^2]}}. \quad (26)$$

Уравнения фазового способа преобразования составляющих исследуемого ПКД на основании (23)–(26) имеют вид [4]

$$\frac{g_x}{g_7} = \frac{\sin(\Psi_1 - \Psi_3)}{\sin(\Psi_2 - \Psi_1)} \cos(\Psi_2 - \Psi_3); \quad (27)$$

$$\frac{b_x}{g_7} = \frac{\sin(\Psi_1 - \Psi_3)}{\sin(\Psi_2 - \Psi_1)} \sin(\Psi_2 - \Psi_3). \quad (28)$$

2.3. Амплитудно-фазовый способ

Амплитудно-фазовый способ измерения параметров комплексного нерезонансного двухэлементного двухполюсника, расположенного в трехполюсной электрической цепи типа «треугольник», реализуется на основе двух тактов изменения конфигурации ИЦ.

Используя выражения (15), (21), получим

$$\cos(\Psi_2 - \Psi_3) = \cos \arctg \frac{b_x}{g_x} = \frac{g_x}{\sqrt{g_x^2 + b_x^2}}; \quad (29)$$

$$\sin(\Psi_2 - \Psi_3) = \sin \arctg \frac{b_x}{g_x} = \frac{b_x}{\sqrt{g_x^2 + b_x^2}}. \quad (30)$$

Уравнения преобразования для составляющих исследуемой комплексной проводимости двухполюсника на основании уравнений (15), (29) и (30) имеют вид

$$g_x = g_7 \frac{U_{22} \cdot U_{13}}{U_{12} \cdot U_{23}} \cos(\Psi_2 - \Psi_3); \quad (31)$$

$$b_x = g_7 \frac{U_{22} \cdot U_{13}}{U_{12} \cdot U_{23}} \sin(\Psi_2 - \Psi_3). \quad (32)$$

При определении составляющих исследуемой комплексной проводимости двухполюсника амплитудно-фазовым способом достаточно синтезировать одну из приведенных выше дополнительную измерительную цепь.

Рассмотренные выше способы измерения параметров ПКД МЭЦ реализуются устройством, представленным на рис. 4, где дополнительно введены: ключи К1, К2 для изменения конфигурации измерительной цепи, шины управления ШУ1, ШУ2 ключами К1 и К2 соответственно, функциональный преобразователь ФП, блоки индикации БИ1 и БИ2 [6].

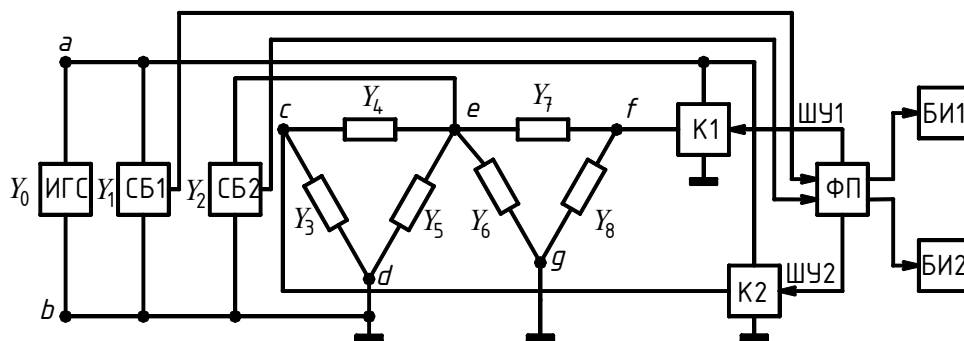


Рис. 4. Устройство измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника, расположенного в многополюсной электрической цепи типа «треугольник»

Заключение

Амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый способы реализуются на основе алгоритмов изменения конфигурации ИЦ, что позволяет исключить влияние на результат измерения ПКД, расположенных в других ветвях МЭЦ, ненулевого значения входной комплексной проводимости преобразователей напряжения и конечного значения внутренней комплексной проводимости источника тока и, таким образом, избавиться от методической погрешности измерения параметров ПКД, расположенного в МЭЦ типа «треугольник», без ее разрыва.

Список литературы

1. **Мартяшин, А. И.** Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
2. **Мартяшин, А. И.** Преобразователи параметров многополюсных электрических цепей / А. И. Мартяшин. – М. : Энергоиздат, 1981. – 72 с.
3. **Харари, Ф.** Теория графов / Ф. Харари. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.
4. **Долбня, В. Т.** Топологические методы анализа и синтеза электрических цепей и систем / В. Т. Долбня. – Харьков : Вища школа, 1974. – 145 с.
5. **Шаманов, Р. С.** Амплитудный и фазовый способы измерения параметров комплексного двухполюсника, расположенного в электрической цепи типа «треугольник» / Р. С. Шаманов, Г. И. Шаронов // Материалы IV Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2006. – Ч. 2. – С. 152–157.
6. Авторское свидетельство СССР 1211667, G01 R 27/02. Микропроцессорное устройство для измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника многополюсной электрической цепи (его варианты) / Шаронов Г. И. – 14.10.1982.

Шаронов Геннадий Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра организации и безопасности
движения, Пензенский государственный
университет архитектуры
и строительства

E-mail: Turboacs@sura.ru

Sharonov Gennady Ivanovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of traffic safety
and organization, Penza State University
of Architecture and Construction

Шаманов Роман Сергеевич

ассистент, кафедра организации
и безопасности движения, Пензенский
государственный университет
архитектуры и строительства

E-mail: Shambox@list.ru

Shamanov Roman Sergeevich

Assistant, sub-department of traffic
safety and organization, Penza State
University of Architecture and Construction

УДК 629.113.004.5

Шаронов, Г. И.

Способы измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника многополюсной электрической цепи типа «треугольник» / Г. И. Шаронов, Р. С. Шаманов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 115–123.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И АППАРАТУРЫ

Аннотация. Рассматриваются вопросы выбора диагностических параметров для прогнозирования технического состояния электронной аппаратуры на основе информационных технологий схемотехнического моделирования.

Ключевые слова: диагностический параметр, оперативный контроль, прогнозирование технического состояния, схемотехническое моделирование, электронные приборы и аппаратура.

Abstract. The article considers the questions of selecting diagnostic parameters in order to forecast technical conditions of electronic equipment based on information technology of circuit simulation.

Key words: diagnostic parameters, operative control, technical conditions forecast, circuit simulation, electronic devices and equipment.

Введение

Тенденция перехода к техническому обслуживанию и ремонту по состоянию распространяется на все новые изделия машиностроения и приборостроения, в том числе на электронные приборы и аппаратуру. Принятие решений о сроках очередного технического обслуживания и ремонта основывается в значительной степени на результатах прогнозирования технического состояния [1]. Вместе с тем результаты прогнозирования технического состояния не могут быть удовлетворительными при неудачном выборе диагностических параметров. Дальнейшее развитие теории прогнозирования технического состояния в части обоснования выбора диагностических параметров продолжает оставаться актуальным.

Диагностические параметры выбираются из состава параметров, характеризующих структурные и функциональные свойства изделия. Структурные параметры обычно труднодоступны при безразборном диагностировании. Функциональные (выходные) параметры не всегда пригодны для прогнозирования технического состояния. Обратные связи и регулировки позволяют поддерживать значения функциональных параметров в задаваемых интервалах при изменении значений структурных параметров. Значительные изменения структурных параметров могут не проявляться или проявляться незначительными изменениями функциональных параметров [2].

Формализованными методами выбора диагностических параметров электронного устройства предусматривается в общем случае формирование уравнений, описывающих взаимосвязь значений входных, структурных и функциональных параметров. Современные программные средства схемотехнического моделирования типа *Micro-Cap* позволяют автоматизировать формирование уравнений, расчет передаточных функций, частотных характеристик, анализ переходных процессов, многовариантный анализ при вариации параметров, статистический анализ методом Монте-Карло. Этих функций достаточно, чтобы автоматизировать выбор параметров и крите-

риев работоспособности для контроля и прогнозирования технического состояния [3].

В данной работе предлагается методика автоматизированного выбора диагностических параметров для контроля и прогнозирования технического состояния приборов и аппаратуры на основе схемотехнического моделирования электронных устройств, обосновывается целесообразность использования токов, потребляемых от источников питания, для оперативного контроля и прогнозирования технического состояния и отказа приборов и аппаратуры.

1. Методика и результаты схемотехнического моделирования

Типовую структуру электронного устройства с обратными связями имеет, например, следящий узкополосный фильтр аппаратуры управления летательным аппаратом (рис. 1). Фильтр относится к замкнутым системам автоматического регулирования параметров выходного сигнала.

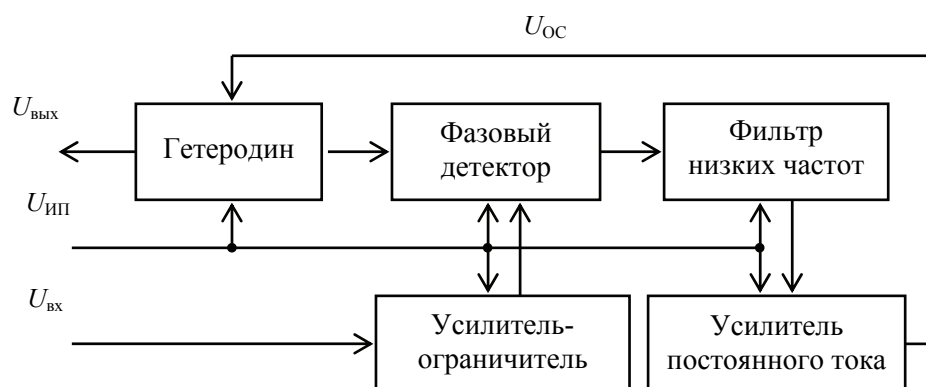


Рис. 1. Структурная схема следящего фильтра

Частота входного сигнала $U_{вх}$ периодически изменяется по синусоидальному закону. Если разность между частотами входного сигнала и сигнала гетеродина $U_{вых}$ велика, то частота гетеродина равна средней частоте входного сигнала и не изменяется. Как только частота входного сигнала приближается к частоте гетеродина (попадает в интервал «захвата»), частота гетеродина начинает изменяться и поддерживается равной частоте входного сигнала. Фильтр «следит» за частотой входного сигнала в интервале «удержания».

Функциональными параметрами фильтра являются частота сигнала гетеродина, интервал частоты захвата и интервал полосы (частоты) удержания входного сигнала. К структурным параметрам относятся, например, электрические параметры изделий электронной техники (микросхем, полупроводниковых приборов, конденсаторов, резисторов и др.), из которых состоит фильтр, и токи, потребляемые составными частями фильтра от источников питания. Значения структурных и функциональных параметров взаимосвязаны.

Моделирование фильтра выполнялось в системе схемотехнического моделирования типа Micro-Cap 7.0. Исходными данными для схемотехнического моделирования электронного устройства (рис. 2) являются принципиальная схема, номенклатура и параметры изделий электронной техники, значения параметров тестовых сигналов.

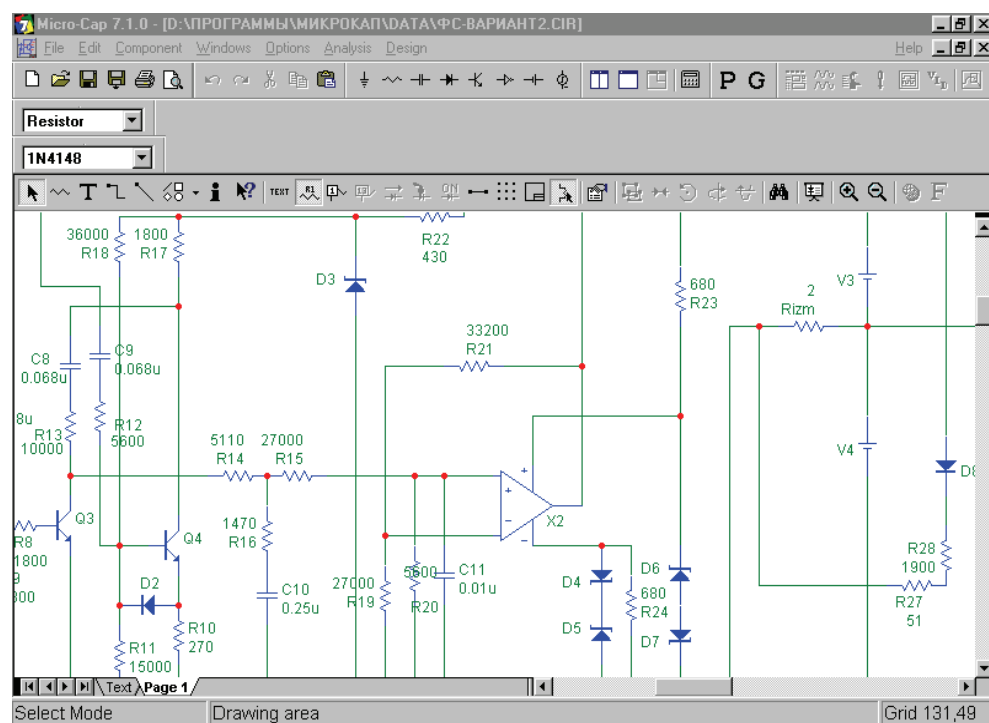


Рис. 2. Фрагмент принципиальной схемы фильтра в системе схемотехнического моделирования

Результаты расчета параметров фильтра в системе схемотехнического моделирования при номинальных значениях параметров изделий электронной техники и тестовых сигналов представлены в табл. 1. Расчетные значения параметров находятся в пределах допустимых значений, установленных в технических условиях на ремонт аппаратуры управления [4], обоснованных расчетами и испытаниями.

Таблица 1
Параметры схемотехнической модели фильтра

Параметры, единицы измерения	Значения параметров	
	допустимые	расчетные
Частота настройки гетеродина, кГц	$22,5 \pm 0,2$	22,51
Интервал частоты захвата, кГц	$3 \pm 0,1$	3,02
Интервал частоты удержания, кГц	$7,2 \pm 0,3$	7,1
Ток, потребляемый от источников питания, мА	—	52,5

Таким образом, результаты моделирования совпадают с результатами расчетов и испытаний, и, следовательно, схемотехническое моделирование может использоваться для исследования взаимосвязей структурных и функциональных параметров электронных устройств при выборе диагностических параметров приборов и аппаратуры.

Диагностические параметры должны удовлетворять требованиям полноты, доступности, информативности. Этим требованиям при оперативном контроле и прогнозировании технического состояния электронных приборов

и аппаратуры в значительной степени удовлетворяют токи, потребляемые от источников питания [2].

Моделирование влияния деградационных изменений параметров изделий электронной техники следящего фильтра на ток, потребляемый от источников питания, выполнялось при следующих допущениях, принятых на основе анализа литературы:

- 1) распределение значений параметров изделий электронной техники подчиняется нормальному закону;
- 2) зависимости значений параметров изделий электронной техники от наработки линейные:

$$\Delta u = K_u u_0 \Delta \tau,$$

где u_0 – начальное значение параметра; K_u – коэффициент деградации [5] (табл. 2); $\Delta \tau$ – наработка.

Таблица 2

Значения коэффициентов деградации
некоторых изделий электронной техники

Изделия электронной техники, параметры	K_u на 1 ч работы, %
Транзисторы, обратный ток коллектора	$+12,5 \cdot 10^{-3}$
Диоды, ток насыщения	$+2,4 \cdot 10^{-3}$
Стабилитроны, ток насыщения	$+2,4 \cdot 10^{-3}$
Конденсаторы, емкость	$-5,3 \cdot 10^{-3}$
Резисторы, сопротивление	$\pm 2 \cdot 10^{-3}$

Статистический анализ потребляемого тока при нормальном распределении параметров изделий электронной техники, выполненный методом Монте-Карло, показал, что значения потребляемого тока при 500, 1000, 1500 и 2000 циклах наработки распределены по нормальному закону (рис. 3). Коэффициенты вариации составляют 0,001, 0,001, 0,002, 0,0025 соответственно. Результаты оценки математического ожидания составили 53,25; 52,36; 50,48; 49,68 миллиампер соответственно.

Полученные результаты моделирования позволяют сделать вывод о монотонном изменении (уменьшении) оценки математического ожидания значений тока, потребляемого от источников питания, с увеличением наработки фильтра.

2. Методика и результаты исследовательских испытаний

Исследовательским ресурсным испытаниям подвергались 10 однородных по техническому состоянию фильтров. Испытания проводились в четыре этапа по методике, установленной техническими условиями на аппаратуру управления (табл. 3).

Ресурс блока до капитального ремонта составляет 2000 включений. Циклы включений повторялись группами по 15–20 включений в группе. Длительность работы включенного фильтра составляла 28–30 с. Время между включениями в группе 5–10 с, время перерыва между группами 15–20 мин. Регистрация изменения параметров проводилась штатными измерительными приборами из состава контрольно проверочной аппаратуры через каждые 125 циклов.

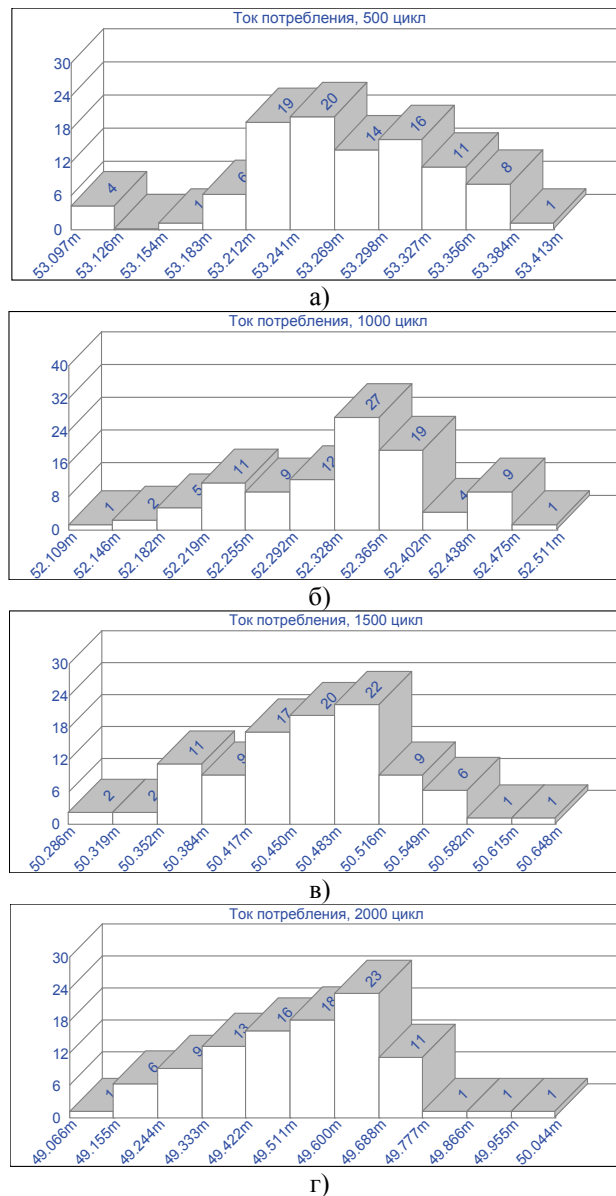


Рис. 3. Гистограммы распределения значений тока: а – наработка 500 циклов; б – наработка 1000 циклов; в – наработка 1500 циклов; г – наработка 2000 циклов

Таблица 3

Условия испытаний фильтров

Напряжение питания, В	I этап	II этап	III этап	IV этап
	Нормальные климатические условия	-50 °С	+50 °С	Нормальные климатические условия, напряжение питания $16 \pm 0,5$ В
	Число циклов включений			
$14,4^{+0,5}$	125	60	60	500
$16 \pm 0,5$	250	130	130	
$18_{-0,5}$	125	60	60	

По результатам испытаний определялось влияние наработки фильтров на функциональные параметры фильтра и токи, потребляемые от источников питания (рис. 4). Там же показаны формы аппроксимирующих кривых.

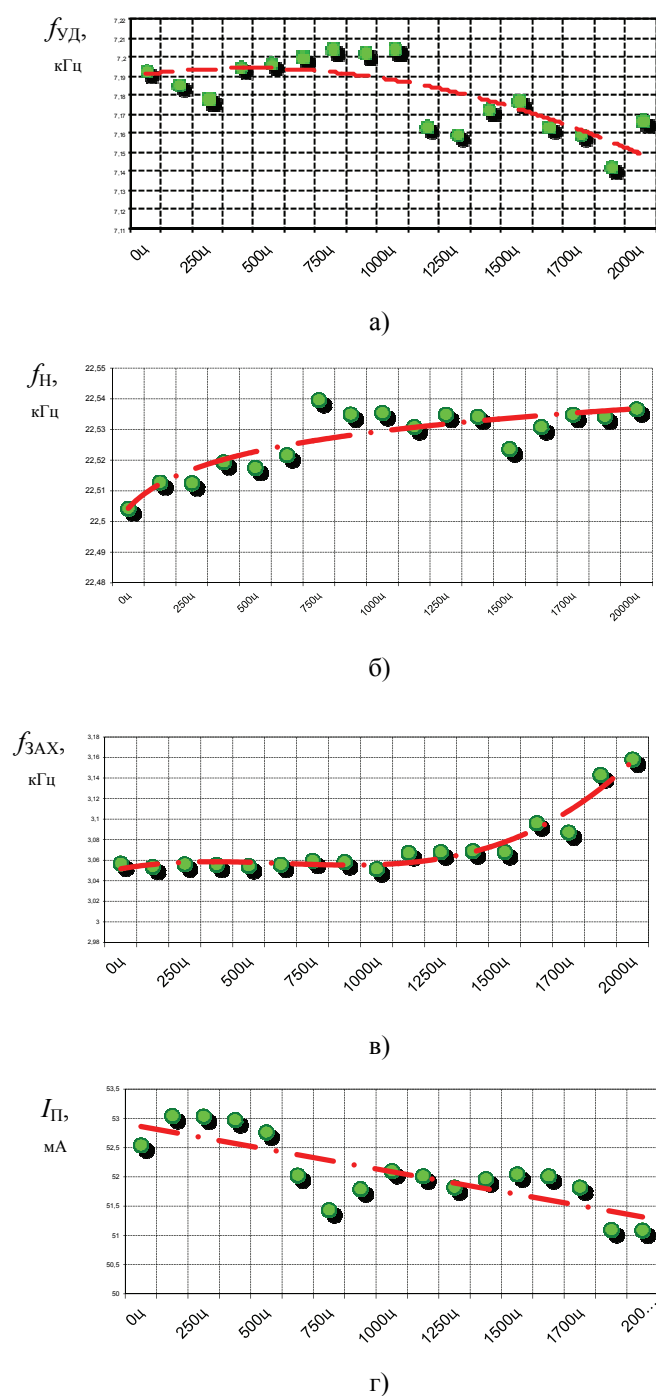


Рис. 4. Зависимости оценок математического ожидания значений параметров следящего фильтра от числа циклов наработки:
 а – интервал частоты удержания; б – частота настройки гетеродина;
 в – интервал частоты захвата; г – ток, потребляемый от источников питания

Соответствие между экспериментальными данными и аппроксимирующими функциями оценивалось по значениям среднего квадратического отклонения и коэффициента корреляции. Для сравнения скорости изменения параметров между собой значения их математических ожиданий приводились к единой системе исчисления, т.е. нормировались. Зависимости нормированных значений частоты настройки гетеродина, интервала частоты удержания, интервала частоты захвата и тока, потребляемого от источников питания, от наработки аппроксимированы соответственно функциям:

$$\begin{aligned} f_{\text{УД}}(t) &= 1 + 4,382 \cdot 10^{-5} \cdot t^{0,5}; \\ f_{\text{Н}}(t) &= 1 - 1,721 \cdot 10^{-9} \cdot t^2; \\ f_{\text{ЗАХ}}(t) &= 0,999 + 2,487 \cdot 10^{-9} \cdot t^2; \\ I_{\text{П}}(t) &= 1 - 1,709 \cdot 10^{-5} \cdot t. \end{aligned}$$

Для оценки скорости изменения параметров от наработки предлагается оценивать абсолютные значения их производных аппроксимирующих функций. Вычисление производных от аппроксимирующих функций показывает, что наибольшую скорость изменения в пределах установленной наработки фильтра имеет ток, потребляемый от источников питания (рис. 5). Его абсолютное значение составило $1,64 \cdot 10^{-5}$.

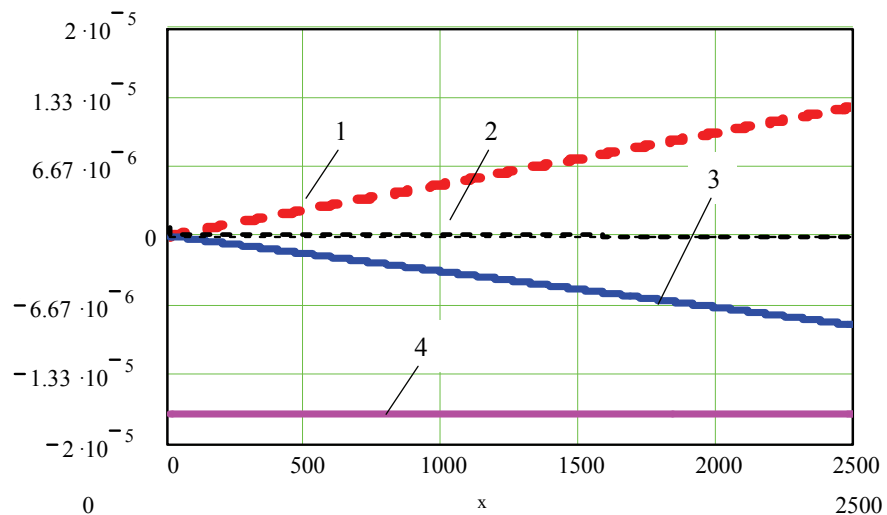


Рис. 5. Зависимости скорости изменения параметров фильтра от наработки:
1 – интервал частоты захвата; 2 – частоты настройки гетеродина;
3 – интервал частоты удержания; 4 – ток, потребляемый от источников питания

Полученные результаты исследовательских испытаний позволяют сделать вывод о наибольшей информативности тока, потребляемого от источников питания, как диагностического параметра для прогнозирования технического состояния электронных устройств приборов и аппаратуры.

Заключение

1. Методикой автоматизированного выбора диагностических параметров приборов и аппаратуры предусматривается обоснование законов распре-

деления значений параметров изделий электронной техники, зависимостей значений параметров изделий электронной техники от наработки, схемотехническое моделирование и статистический анализ методом Монте-Карло параметров электронных устройств, экспертный анализ результатов моделирования для определения наиболее информативных диагностических параметров.

2. Токи, потребляемые от источников питания, более чувствительны к деградации параметров изделий электронной техники с увеличением наработки, чем функциональные параметры электронных устройств. Потребляемые токи изменяются монотонно и быстрее функциональных параметров. Учитывая также относительную простоту и возможность совмещения средств контроля токов с устройствами защиты от перегрузки, целесообразно использовать параметры токов в качестве универсальных диагностических параметров при оперативном контроле и прогнозировании технического состояния приборов и аппаратуры.

3. Результаты схемотехнического моделирования электронных устройств в виде законов распределения случайных значений функциональных параметров и потребляемых токов при задаваемой наработке могут применяться для прогнозирования значений как самих диагностических параметров (технического состояния), так и показателей безотказности и долговечности (отказа) приборов и аппаратуры с использованием известных математических методов прогнозирования.

4. Достоверность результатов прогнозирования технического состояния и отказа электронных устройств в значительной степени зависит от обоснованности принятых законов распределения, зависимостей значений параметров изделий электронной техники от наработки. Необходимы дальнейшие исследования закономерностей изменения параметров от наработки как для традиционных, так и перспективных изделий электронной техники.

Список литературы

1. Диагностирование, ремонт и техническое обслуживание систем управления бытовых машин и приборов : учебник / Ж. А. Романович и др. – М. : Дашков и Ко, 2008. – 316 с.
2. **Фандеев, В. П.** Выбор диагностических параметров для прогнозирования технического состояния электронных приборов и аппаратуры / В. П. Фандеев, А. В. Заяра, Д. В. Фандеев // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – С. 92–93.
3. **Фандеев, В. П.** Использование информационных технологий для разработки диагностического обеспечения электронных устройств / В. П. Фандеев, В. С. Волков, И. Н. Баринов // Технологии приборостроения. – 2006. – № 4. – С. 24–27.
4. Блок аппаратурный 9С474-1.00.000. Технические условия. – М. : МО, 1983. – 188 с.
5. **Прытков, С. Ф.** Надежность электрорадиоизделий : справочник / С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева. – СПб. : РНИИ «Электронстандарт», 2002. – 450 с.

Тутушкин Владимир Ильич

преподаватель, кафедра
радиотехнических систем, Пензенский
артиллерийский инженерный институт

E-mail: tutvlad@rambler.ru

Tutushkin Vladimir Ilyich

Lecturer, sub-department of radio
engineering systems, Penza Artillery
Engineering Institute

Фандеев Владимир Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра приборостроения, Пензенский
государственный университет

E-mail: lyudmilarotmanova@yandex.ru

Fandeev Vladimir Petrovich

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

УДК 623.419

Тутушкин, В. И.

Методический подход к выбору диагностического параметра для прогнозирования технического состояния электронных приборов и аппаратуры / В. И. Тутушкин, В. П. Фандеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 124–132.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ¹

Аннотация. Описана экспериментальная установка, которая позволяет получить корреляционную функцию шумового сигнала исследуемого образца. Работа установки проверена на модельной RC-цепи.

Ключевые слова: диэлектрические материалы, электрические свойства, диэлектрические измерения, корреляционная функция.

Abstract. The article describes an experimental unit allowing to obtain a correlation function of a noise signal of a sample under examination. The unit performance is tested on the model RC-chain.

Key words: dielectric materials, electrical properties, dielectric measures, correlation function.

Введение

Важную часть физических исследований диэлектрических материалов составляет изучение их электрических свойств, несущих информацию о внутренних параметрах и динамике молекул. Сравнение теории с экспериментом ведется сейчас, как правило, на уровне спектров комплексной диэлектрической проницаемости, так как именно эта величина измеряется традиционными методами – мостовыми, резонаторными и т.п., хотя более естественной является интерпретация в терминах дипольных корреляционных функций. Флуктуационные методы позволяют непосредственно получать дипольные корреляционные функции для системы, находящейся в равновесном состоянии, что особенно ценно при исследовании нелинейных сред. Практический способ определения параметров дебаевских диэлектриков путем измерения корреляционной функции шумовой (флуктуационной) ЭДС, существующей на обкладках конденсатора, заполненного исследуемым образцом, описан в работе [1]. Принципиальной особенностью флуктуационных измерений является то, что они не нарушают теплового равновесия в исследуемой системе. Метод может оказаться особенно полезным при изучении сред с сильной нелинейностью по электрическому полю, например: сегнетоэлектриков [1], ферроэлектрических жидких кристаллов [2] или растворов биополимеров.

1. Обобщение формулы Найквиста

Применение флуктуационно-диссипационной теоремы (ФДТ) [3] в классическом приближении ($\hbar\nu \ll kT$) к случаю пассивного линейного двухполюсника с комплексным импедансом $Z(\omega)$ приводит к формуле Найквиста [4]:

$$S_x(\omega) = 2kT \operatorname{Re} Z(\omega), \quad (1)$$

¹ Статья написана при поддержке гранта «Развитие научного потенциала высшей школы», код проекта 2.1.1/2474.

где $S_x(\omega)$ – спектральная плотность мощности флуктуационной ЭДС $X(t)$, существующей на зажимах двухполюсника,

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K_x(t) \exp(-i\omega t) dt = 2 \int_0^{\infty} K_x(t) \cos(\omega t) dt, \quad (2)$$

где $K_x(t)$ – автокорреляционная функция (АКФ) напряжения $X(t)$ (последнее равенство – следствие четности автокорреляционной функции).

Из (1) и (2) имеем

$$\int_0^{\infty} K_x(t) \cos(\omega t) dt = kT \operatorname{Re} Z(\omega). \quad (3)$$

Комплексный импеданс можно представить как лапласовское изображение соответствующей функции отклика $a(t)$:

$$Z(\omega) = L[a(t)] = \int_0^{\infty} a(t) \exp(-st) dt, \quad s = \alpha + i\omega, \alpha \rightarrow 0. \quad (4)$$

$$\text{Тогда } \operatorname{Re} Z(\omega) = \int_0^{\infty} \exp(-\alpha t) a(t) \cos(\omega t) dt, \quad \alpha \rightarrow 0, \text{ и в силу (3) для } t \geq 0$$

получаем

$$K_x(t) = kT a(t) \quad (5)$$

при $t < 0$ $a(t) = 0$ по определению.

АКФ стационарного эргодического случайного процесса $X(t)$, каким и является тепловой шум, определяется как

$$K_x(t) \equiv K_{xx}(t) = \lim_{T' \rightarrow \infty} \frac{1}{T'} \int_0^{T'} X(t') X(t' + t) dt'$$

(см., например, [4]).

Учитывая соотношение (4), приходим к окончательному выражению – обобщенной форме уравнения (1):

$$L[K_x(t)] = kTZ(\omega) \quad (6)$$

или

$$Z(\omega) = (1/kT) L[K_x(t)]. \quad (7)$$

Формула (7) есть прямое выражение для комплексного импеданса двухполюсника через автокорреляционную функцию его тепловых шумов [5, 6].

2. Экспериментальная установка для флуктуационных диэлектрических измерений

Прототип шумового (флуктуационного) диэлектрического спектрометра, созданного на кафедре физики молекулярных систем Казанского

государственного университета и Казанского физико-технического института им. Е. К. Завойского Казанского научного центра РАН, представляет собой измерительно-вычислительный комплекс для исследования диэлектрических образцов методом корреляционного анализа тепловых шумов в диапазоне частот от 10^2 до $5 \cdot 10^8$ Гц.

Базовая часть установки (рис. 1) включает в себя входную измерительную цепь, широкополосный усилитель (ШПУ) с входным полевым каскадом, высокоскоростной аналого-цифровой преобразователь АЦП Lan1-USB (ЗАО «Руднев-Шиляев») с частотой дискретизации 2 ГГц, ноутбук (компьютер PC). Во флуктуационных измерениях может быть использована одна и та же измерительная ячейка, представляющая собой плоско-параллельный конденсатор, заполняемый исследуемым веществом.

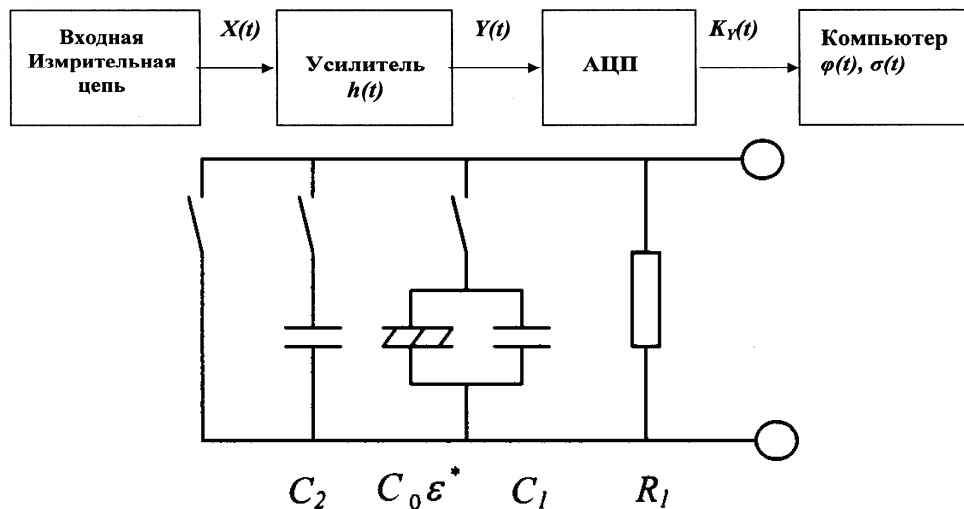


Рис. 1. Блок-схема шумового диэлектрического спектрометра и принципиальная схема входной измерительной цепи

В процессе работы установки регистрируется конечная (во времени) реализация теплового шума на обкладках измерительной ячейки с образцом. Шумовой сигнал, усиленный широкополосным усилителем с полевым входом (рис. 2) (время нарастания переходной характеристики $5ns$, коэффициент усиления напряжения 10^4) поступает на вход АЦП (рис. 3).

Процесс измерения сводится к регистрации поступающего на вход АЦП усиленного флуктуационного напряжения и сохранению его в память компьютера (рис. 4). Дальнейшая обработка производится в программной среде MATLAB.

Для учета собственных шумов ШПУ и определения абсолютного масштаба измерений корреляционной функции используются два вспомогательных режима – с короткозамкнутым входом усилителя и с эталонной емкостью C_2 (рис. 1), включенной вместо измерительной ячейки.

На рис. 5 представлена корреляционная функция теплового сигнала модельной RC-цепочки и собственных шумов усилителя, причем амплитуда собственных шумов усилителя, приведенных к входу, много меньше амплитуды тепловых шумов входной цепи. Модельная RC-цепочка представляет

собой параллельное соединение резистора $R = 1$ Мом и емкости $C = 2$ пФ, образованной входной емкостью транзистора и емкостью монтажа.

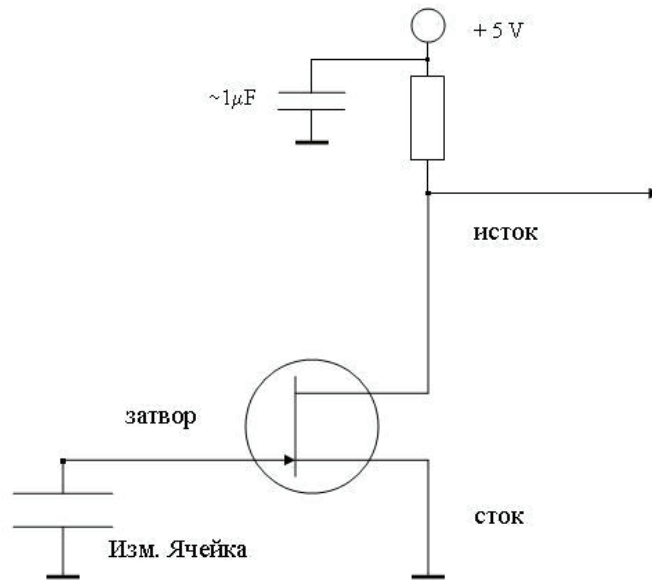


Рис. 2. Входной каскад усилителя на полевом транзисторе

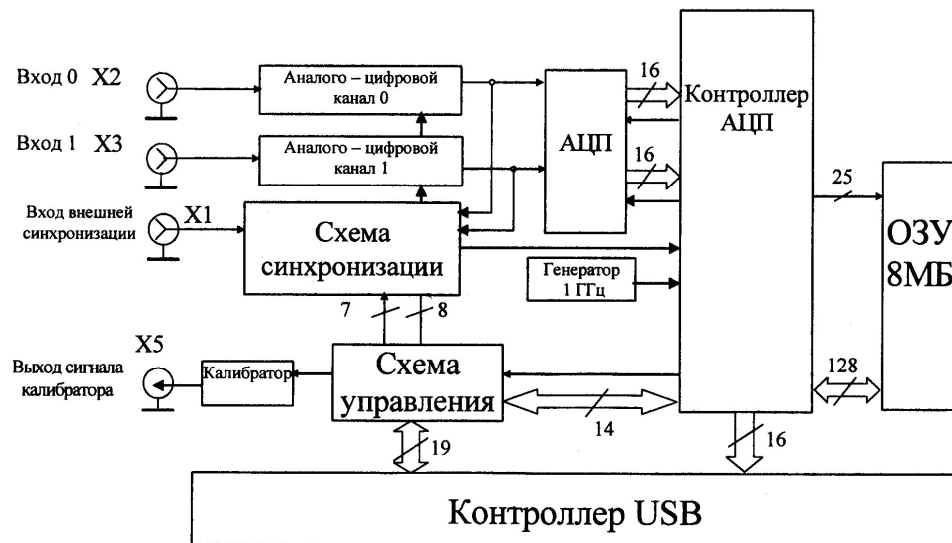


Рис. 3. Функциональная схема АЦП

Заключение

Из анализа полученной корреляционной функции сигнала модельной RC -цепочки следует, что предложенная экспериментальная установка позволяет получить корректные результаты на модельных цепях.

Важным достоинством описанного подхода является то, что можно вычислять не только корреляционную функцию шумового сигнала, но и любые статистические характеристики этого сигнала, например функцию распреде-

ления, моментные функции (целого или дробного порядка), регрессионные функции и т.д.

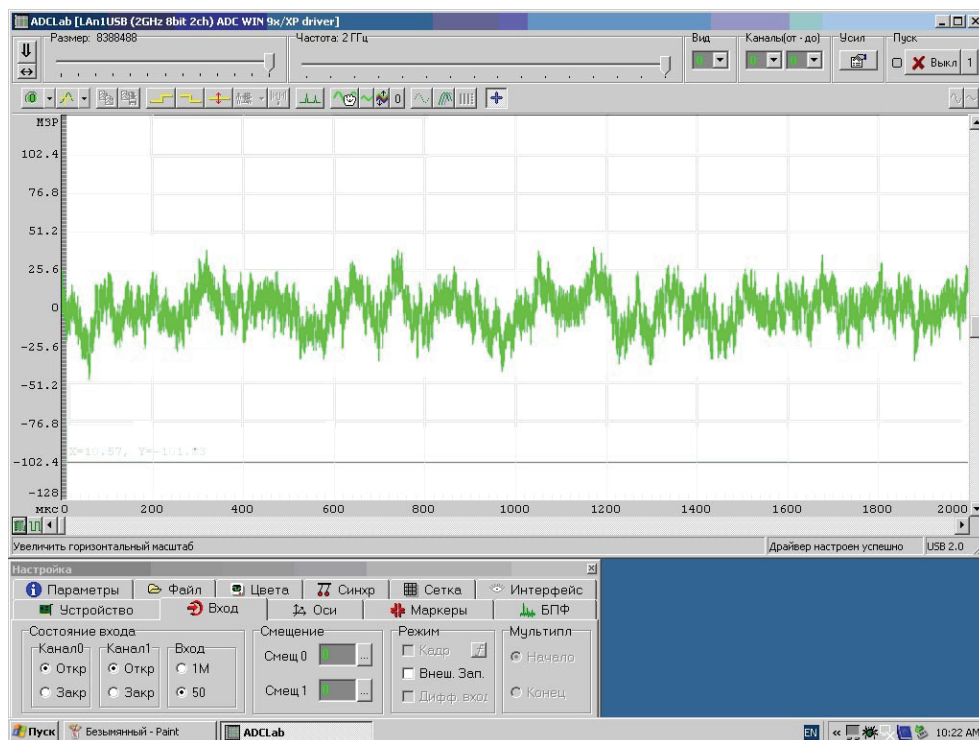


Рис. 4. Регистрация усиленного флуктуационного напряжения

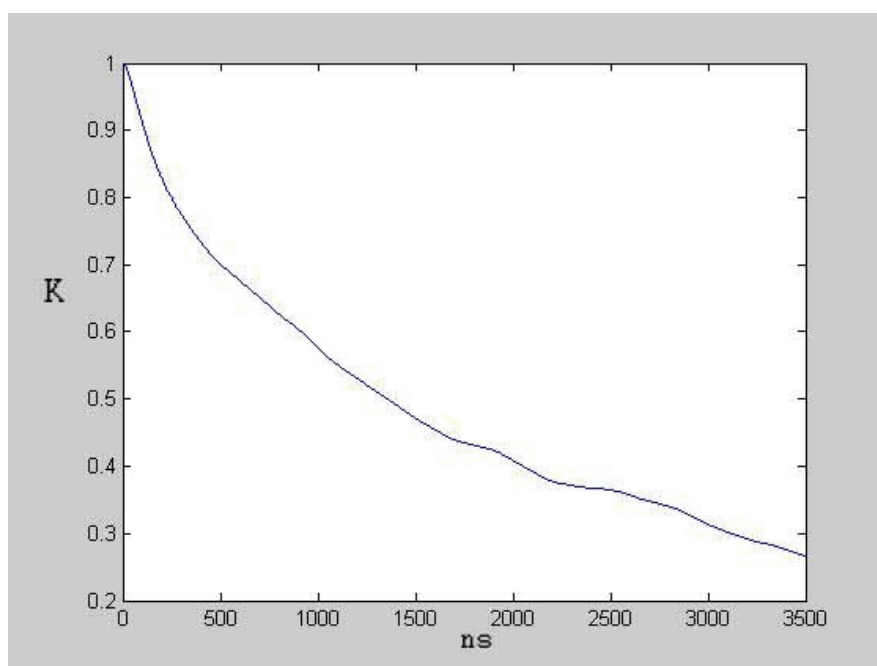


Рис. 5. Автокорреляционная функция тепловых шумов модельной RC-цепочки

Список литературы

1. **Micheron, F.** Determination experimentale de proprietes d'un dielectrique par analyse de la fonction de correlation de son bruit thermique / F. Micheron, L. Godefroy // *Rev. Phys. Appl.* – 1972. – V. 7. – P. 279–281.
2. **Maruyama, N.** Critical behavior in ferroelectric liquid crystal / N. Maruyama // *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1980. – V. 49, Suppl. B. – P. 175–177.
3. **Ландау, Л. Д.** Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1976. – Ч. 1. – 584 с.
4. **Лифшиц, Е. М.** Статистическая физика / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – М. : Наука, 1978. – Ч. 2. – 448 с.
5. **Goncharov, V. A.** On the study of the dynamical behaviour of dielectrics by thermal-noise correlation analysis / V. A. Goncharov, I. V. Ovchinnikov // *Chem. Phys. Letters.* – 1984. – V. 111, № 6. – P. 521–525.
6. **Гончаров, В. А.** Корреляционный анализ тепловых шумов как метод исследования диэлектрической релаксации / В. А. Гончаров И. В. Овчинников // *Журнал технической физики.* – 1986. – Т. 56, В. 1. – С. 198–201.

Лунев Иван Владимирович

кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель, кафедра
радиоэлектроники, Казанский
государственный университет

E-mail: Lounev75@mail.ru

Lunev Ivan Vladimirovich

Candidate of physical and mathematical
sciences, senior lecturer, sub-department
of radio electronics, Kazan State University

Сараев Денис Владимирович

кандидат химических наук, научный
сотрудник, кафедра молекулярных
систем, Казанский государственный
университет

E-mail: denisay@mail.ru

Saraev Denis Vladimirovich

Candidate of chemical sciences, researcher,
sub-department of molecular systems,
Kazan State University

Каргин Роман Владимирович

научный сотрудник, кафедра
молекулярных систем, Казанский
государственный университет

E-mail: Lounev75@mail.ru

Kargin Roman Vladimirovich

Researcher, sub-department of molecular
systems, Kazan State University

Гончаров Владимир Анатольевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Лаборатория молекулярной
радиоспектроскопии, Казанский
физико-технический институт
им. Е. К. Завойского Казанского
научного центра РАН

E-mail: Lounev75@mail.ru

Goncharov Vladimir Anatolyevich

Candidate of physical and mathematical
sciences, senior staff scientist, Laboratory
of molecular radio-frequency spectroscopy,
Kazan Physicotechnical Institute
named after E. K. Zavoysky Kazansky
of the research center of the Russian
Academy of Sciences

УДК 532.74:538.66.:538.27

Лунев, И. В.

Экспериментальная установка для флуктуационных диэлектрических измерений / И. В. Лунев, Д. В. Сараев, Р. В. Каргин, А. В. Гончаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 133–139.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.888.4.001.2

В. И. Волчихин, А. Н. Литвинов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ ПРИБОРОВ

Аннотация. Разработана математическая модель для расчета собственных частот и предельных виброперегрузок для плоских контактных пластин переменного сечения, имеющих произвольно расположенную упругую промежуточную опору. Рассмотрены пластины, находящиеся в замкнутом состоянии. Установлено наличие оптимальных параметров, позволяющих существенно повысить виброустойчивость контактных систем. Показана удовлетворительная согласованность результатов теоретических расчетов с экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: контактная пластина, упругая опора, собственная частота, предельная виброперегрузка, виброустойчивость.

Abstract. The authors has developed a mathematical model for calculation of eigenfrequencies and limiting vibroaccelerations of variable cross-section flat contact plates with arbitrarily located elastic intermediate support. The article considers the plates in the closed condition. The researcher has established the existence of optimum parameters allowing to raise vibrostability of contact systems essentially. The article also shows acceptable compliance of theoretical calculations results and experimental research.

Key words: contact plate, elastic support, eigenfrequency, limiting vibroacceleration, vibrostability.

Введение

Распространенными элементами аппаратуры связи, радиоэлектроники и автоматики являются различные реле, включатели и другие электромеханические устройства, одними из основных рабочих элементов которых являются плоские контактные пластины. В процессе эксплуатации аппаратура подвергается воздействию вибрации, которая непосредственно влияет на ее работоспособность, вызывая самопроизвольное размыкание контактов, их дребезг, дополнительный износ контактов и т.п. Эти нарушения наиболее резко проявляются при вибрации аппаратуры на частотах, совпадающих с собственными частотами изгибных колебаний контактных пластин, или близких к ним. Анализ работы указанных электромеханических устройств показывает, что их виброустойчивость существенно зависит от виброустойчивости контактных пластин.

Одним из путей повышения виброустойчивости контактных систем и аппаратуры в целом является устранение резонансных явлений контактных пластин путем повышения их собственных частот изгибных колебаний и вывода их из диапазона частот внешних возмущений. Расчет собственных ча-

стот колебаний различных контактных пластин, находящихся в разомкнутом состоянии, производится в соответствии с методиками, изложенными в [1] и обобщенными в удобной для инженерных расчетов форме. Однако диапазон частот внешних эксплуатационных воздействий часто оказывается достаточно широким, что в значительной степени затрудняет, а в ряде случаев не позволяет проектировать безрезонансные контактные системы. В связи с этим весьма важна разработка методов исследования виброустойчивости контактных пластин, позволяющих определять предельные вибрационные перегрузки, при которых обеспечивается нормальная работа контактных пластин. Разработка методов расчета виброустойчивости позволит на стадии проектирования выбирать оптимальные конструктивные параметры контактных пластин, сократить сроки и объем экспериментальных работ при отработке конструкций.

1. Обобщенная модель контактной пластины

Рассмотрим плоскую контактную пластину, имеющую в самом общем случае переменное поперечное сечение. Пластина жестко закреплена в корпусе прибора, имеет промежуточную упругую опору с коэффициентом жесткости c и находится в замкнутом состоянии (рис. 1).

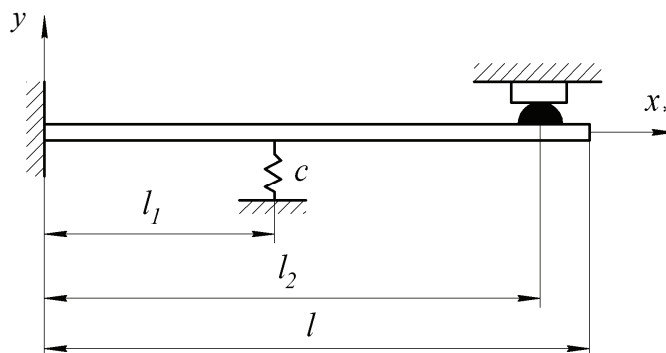


Рис. 1. Расчетная схема контактной пластины: l — длина пластины; l_1, l_2 — координаты расположения упругой опоры и массы контакта соответственно

Взаимное расположение упругой опоры и массы контакта произвольное, т.е. возможны варианты $l_2 \geq l_1$ и $l_2 < l_1$.

В замкнутом состоянии контактная пластина прижата к жесткому упору начальным контактным усилием P_0 , величина которого обычно задается в конструкторской документации, обеспечивается конструкцией контактного узла и служит для обеспечения надежного электрического контакта.

При воздействии вибрации происходят колебания корпуса, в котором закреплена пластина, а величина контактного усилия будет изменяться и при определенном значении вибрационной перегрузки может обратиться в нуль. При дальнейшем увеличении перегрузки происходит размыкание замкнутых контактов.

Условие сохранения контакта имеет вид

$$P = P_0 - |R + Q| > 0, \quad (1)$$

где P — контактное усилие при воздействии внешней вибрации; R — инерционная сила массы контакта M ; Q — упругая динамическая реакция пластины

в точке контактирования. Начальное контактное усилие P_0 обеспечивается конструктивно и считается известным.

Для удобства исследований введены безразмерные параметры: $\beta = l_1/l$ и $\mu = l_2/l$ – координаты, определяющие расположение упругой опоры и массы контакта; $x = x_*/l$ – безразмерная продольная координата.

Корпус, в котором закреплена пластина, подвергается возмущающей вибрации с амплитудой действующего ускорения a_0 . В этом случае амплитуда инерционной силы массы контакта равна $R = Ma_0$.

Амплитуда динамической реакции Q равна поперечной силе в месте расположения контакта

$$Q = \frac{1}{l^3} \frac{d}{dx} \left[EJ(x) \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \right] \Big|_{x=\mu}, \quad (2)$$

где $\varphi(x)$ – форма колебаний контактной пластины; $J(x) = J_0 \cdot \bar{J}(x)$ – момент инерции поперечного сечения пластины; J_0 – момент инерции поперечного сечения пластины при $x = 0$; $\bar{J}(x)$ – безразмерная функция, характеризующая закон изменения момента инерции по длине пластины; E – модуль упругости материала пластины.

Собственная частота рассматриваемой контактной системы определяется как

$$\omega_j = \frac{\alpha_j^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_0}{m_0}}, \quad (3)$$

где α_j – частотный коэффициент; $m_0 = \rho F_0$ – распределенная масса пластины; ρ – плотность материала пластины; F_0 – площадь поперечного сечения при $x = 0$; $j = 1, 2, \dots$ – номер собственной частоты. Площадь поперечного сечения определяется как $F(x) = F_0 \cdot \bar{F}(x)$, где $\bar{F}(x)$ – безразмерная функция, характеризующая изменение площади по длине пластины.

Если для рассматриваемой контактной пластины определен частотный коэффициент α_1 , основная собственная частота ω_1 вычисляется по формуле (3), а собственная форма колебаний, соответствующая этой частоте, может быть представлена с точностью до некоторой постоянной C в виде

$$\varphi(x) = C \cdot y(x, \alpha). \quad (4)$$

При установившихся вынужденных колебаниях контактной пластины с частотой $\omega = \omega_1$ выполняется условие баланса энергий:

$$U = \Delta \mathcal{E}, \quad (5)$$

где U – энергия, подводимая к контактной пластине и равная работе внешних сил за период колебаний $T = 2\pi/\omega_1$; $\Delta \mathcal{E}$ – энергия, рассеиваемая за тот же период колебаний.

Работа внешних сил равна

$$U = l \int_0^1 \int_0^T p(x) \frac{\partial Y(x, t)}{\partial t} dx dt, \quad (6)$$

где $p(x) = m(x)a_0 \sin \omega_1 t$ – интенсивность инерционных сил, действующих на контактную пластину, $m(x) = m_0 \bar{F}(x)$.

При резонансе перемещения точек контактной пластины сдвинуты по фазе относительно внешних сил на $\pi/2$ [2]

$$Y(x, t) = \varphi(x) \cos \omega_1 t. \quad (7)$$

$$\text{С учетом (7) получим } U = \pi m_0 l a_0 C \int_0^1 \bar{F} y(x) dx.$$

Рассеиваемая энергия равна

$$\Delta \mathcal{E} = \psi \mathcal{E}, \quad (8)$$

где ψ – коэффициент поглощения, характеризующий относительное рассеяние энергии за полный период колебаний контактной пластины;

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} m_0 l \omega_1^2 C^2 \int_0^1 \bar{F}(x) [y(x)]^2 dx. \quad (9)$$

Вычисляя рассеиваемую за полный цикл колебаний энергию $\Delta \mathcal{E}$ и используя условие (5), получим выражение для искомой постоянной:

$$C = \frac{2\pi a_0}{\psi \omega_1^2} \frac{\int_0^1 \bar{F}(x) y(x) dx}{\int_0^1 \bar{F}(x) [y(x)]^2 dx}. \quad (10)$$

Амплитуда динамической реакции в соответствии с (2) в самом общем случае определяется выражением

$$Q = \frac{EJ_0}{l^3} C \frac{d}{dx} \left[\bar{J}(x) \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \right] \Big|_{x=\mu}. \quad (11)$$

Предельной виброперегрузкой K_0 будем считать минимальную перегрузку, при которой нарушается условие виброустойчивости (1). Тогда предельная виброперегрузка определяется как $K_0 = a_0/g$, где a_0 – минимальное значение внешнего вибрационного ускорения, вызывающее нарушение условия (1); g – ускорение свободного падения.

При вибрации с перегрузками $K > K_0$ происходит размыкание ранее замкнутых контактов и их дребезг. Для определения предельной виброперегрузки рассмотрим установившиеся вынужденные колебания контактной пластины с угловой частотой ω , совпадающей с основной (первой) собственной частотой ω_1 изгибных колебаний контактной пластины. В этом случае имеет место резонанс контактной пластины, а значение предельной перегрузки оказывается минимальным из всех возможных.

В соответствии с условием (1) выражение для предельной виброперегрузки имеет вид

$$K_0 = \frac{P_0}{G \left| n + \frac{2\pi}{\psi} \Phi \right|}, \quad (12)$$

где $n = M/m_0 l$ – относительная масса контакта; $G = m_0 l g$ – вес контактной пластины постоянной ширины, равной ширине у заземленного края; Φ – безразмерная функция, которая в общем случае имеет вид

$$\Phi = \frac{1}{\alpha^4} \frac{d}{dx} \left[\bar{J}(x) \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \right] \Big|_{x=\mu} \cdot \frac{\int_0^1 \bar{F}(x) y(x) dx}{\int_0^1 \bar{F}(x) [y(x)]^2 dx}. \quad (13)$$

Функция Φ зависит от частотного коэффициента α , соответствующего расчетной схеме конкретной контактной пластины и определяющего форму колебаний $y(x)$, т.е. существенно зависит от основных параметров контактной пластины.

Формула (12) получена для общего случая плоской контактной пластины, которая имеет переменное поперечное сечение, в (12) входит параметр ψ , характеризующий относительное рассеяние энергии в контактной пластине. При наличии специальных демпфирующих устройств (например, вибродемпфирующих покрытий) необходимо учитывать рассеяние энергии как в демпфирующих устройствах, так и в самом материале контактной пластины. Коэффициент поглощения ψ в этом случае определяется как

$$\psi = \psi_0 + \psi_M, \quad (14)$$

где ψ_0 – коэффициент поглощения, обеспечиваемый демпфирующими устройствами; $\psi_M = 2\delta$ – коэффициент поглощения для материала контактной пластины; δ – логарифмический декремент колебаний [3].

Анализ формулы (12) показывает, что величина предельной виброперегрузки пропорциональна начальному контактному усилию N_0 , обратно пропорциональна весу контактной пластины и массе контакта. При увеличении демпфирования величина предельной перегрузки возрастает, что способствует повышению виброустойчивости контактной пластины.

2. Контактные пластины постоянного сечения

Рассмотрим контактную пластину постоянного поперечного сечения при $\bar{J}(x) = \bar{F}(x) = 1$. В этом случае можно построить точное решение. Колебательный процесс рассматриваем до момента отрыва контакта от опоры, т.е. при $P \geq 0$. Необходимо рассмотреть два варианта взаимного расположения упругой опоры и массы контакта.

2.1. Контакт расположен справа от упругой опоры ($\mu \geq \beta$)

Форма собственных колебаний определяется выражениями

$$\varphi(x) = \begin{cases} \varphi_1(x) = C_1 U(\alpha x) + C_2 V(\alpha x) \text{ при } 0 \leq x \leq \beta; \\ \varphi_2(x) = \varphi_1(x) - \frac{\bar{c}}{\alpha^3} \varphi(\beta) V[\alpha(x - \beta)] \text{ при } \beta \leq x \leq \mu; \\ \varphi_3(x) = \varphi_2(x) + \frac{Pl^3}{\alpha^3 EJ} V[\alpha(1 - \mu)] \text{ при } \mu \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (15)$$

Здесь C_1, C_2 – произвольные постоянные; P – неизвестная реакция со стороны неподвижной опоры; $\bar{c} = \frac{l^3}{EJ_0} c$ – относительная жесткость упругой опоры; U, V, T, S – функции Крылова [4].

Удовлетворяя условиям неразрывности решений $\varphi_1(\beta) = \varphi_2(\beta)$, $\varphi_2(\mu) = 0$ и граничным условиям на правом конце пластины ($x = 1$)

$$\left. \frac{d^2 \varphi}{dx^2} \right|_{x=1} = \left. \frac{d^3 \varphi}{dx^3} \right|_{x=1},$$

получим систему четырех однородных алгебраических уравнений относительно $C_1, C_2, \varphi(\beta)$ и P . Из условия нетривиальности решения получим частотное уравнение относительно коэффициента α :

$$\begin{aligned} & \bar{c} \left\{ U(\alpha\beta) \{ \Delta_1 V(\alpha\mu) - \Delta_2 V[\alpha(\mu - \beta)] \} - V(\alpha\beta) \{ \Delta_1 U(\alpha\mu) - \right. \\ & \left. - \Delta_3 V[\alpha(\mu - \beta)] \} \right\} + \alpha^3 [\Delta_2 U(\alpha\mu) - \Delta_3 V(\alpha\mu)] = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= T[\alpha(1 - \beta)] S[\alpha(1 - \mu)] - S[\alpha(1 - \beta)] T[\alpha(1 - \mu)]; \\ \Delta_2 &= T(\alpha) S[\alpha(1 - \mu)] - S(\alpha) T[\alpha(1 - \mu)]; \\ \Delta_3 &= S(\alpha) S[\alpha(1 - \mu)] - V(\alpha) T[\alpha(1 - \mu)]. \end{aligned}$$

Минимальный корень этого трансцендентного уравнения определяет частотный коэффициент α_1 для основной собственной частоты ω_1 .

Формы колебаний (4), соответствующие основной собственной частоте замкнутой контактной пластины, определяются через гармонические коэффициенты влияния [4]. Окончательно, учитывая (4), получим

$$\begin{aligned} y_1(x) &= U(\alpha x) + \frac{\Delta_c}{\Delta} V(\alpha x), \\ y_2(x) &= y_1(x) - \frac{\bar{c}}{\alpha^3} \frac{\Delta_\beta}{\Delta} V[\alpha(x - \beta)], \\ y_3(x) &= y_2(x) + \alpha \frac{\Delta_\mu}{\Delta} V[\alpha(x - \mu)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}\Delta &= V(\alpha\mu)T[\alpha(1-\mu)] - \frac{\bar{c}}{\alpha^3}V(\alpha\beta)V[\alpha(\mu-\beta)]T[\alpha(1-\beta)], \\ \Delta_c &= U(\alpha\mu)T[\alpha(1-\mu)] - \frac{\bar{c}}{\alpha^3}U(\alpha\beta)V[\alpha(\mu-\beta)]T[\alpha(1-\mu)], \\ \Delta_\beta &= T[\alpha(1-\mu)]\{V(\alpha\beta)U(\alpha\mu) - U(\alpha\beta)V(\alpha\mu)\}, \\ \Delta_\mu &= V(\alpha\mu)S(\alpha) - U(\alpha\mu)T(\alpha) - \\ &\quad - \frac{\bar{c}}{\alpha^3}V(\alpha\beta)\{V[\alpha(\mu-\beta)]S(\alpha) - T[\alpha(1-\beta)]U(\alpha\mu)\} - \\ &\quad - \frac{\bar{c}}{\alpha^3}U(\alpha\beta)\{T[\alpha(1-\beta)]V(\alpha\mu) - V[\alpha(\mu-\beta)]T(\alpha)\}.\end{aligned}\quad (18)$$

2.2. Контакт расположен слева от упругой опоры ($\mu \leq \beta$)

Задача решается аналогично 2.1. Трансцендентное частотное уравнение имеет вид

$$\begin{aligned}\bar{c} \left\{ U(\alpha\mu) \left\{ \Delta_1^* V(\alpha\beta) - \Delta_2^* V[\alpha(\beta-\mu)] \right\} - V(\alpha\mu) \left\{ \Delta_1^* U(\alpha\beta) - \right. \right. \\ \left. \left. - \Delta_3^* V[\alpha(\beta-\mu)] \right\} \right\} + \alpha^3 \left[\Delta_2^* U(\alpha\mu) - \Delta_3^* V(\alpha\mu) \right] = 0,\end{aligned}\quad (19)$$

где Δ_1^* вычисляется по формуле $\Delta_1^* = -\Delta_1$, а Δ_2^* и Δ_3^* определяются выражениями для Δ_2 и Δ_3 соответственно, если в них параметры μ и β поменять местами.

Формы колебаний имеют вид

$$\begin{aligned}y_1^*(x) &= U(\alpha x) + \frac{\Delta_c^*}{\Delta^*} V(\alpha x), \\ y_2^*(x) &= y_1(x) + \frac{\Delta_\mu^*}{\Delta^*} V[\alpha(x-\mu)], \\ y_3^*(x) &= y_2(x) - \frac{\bar{c}}{\alpha^3} \frac{\Delta_\beta^*}{\Delta^*} V[\alpha(x-\beta)],\end{aligned}\quad (20)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned}\Delta^* &= \left\{ T[\alpha(1-\mu)] - \frac{\bar{c}}{\alpha^3} T[\alpha(1-\beta)] V[\alpha(\beta-\mu)] \right\} V(\alpha\mu), \\ \Delta_c^* &= U(\alpha\mu) \left\{ T[\alpha(1-\mu)] - \frac{\bar{c}}{\alpha^3} V[\alpha(\beta-\mu)] T[\alpha(1-\beta)] \right\},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\mu}^* &= V(\alpha\mu) \left\{ S(\alpha) - \frac{\bar{c}}{\alpha^3} V[\alpha(\beta - \mu)] T[\alpha(1 - \beta)] \right\} - \\ &\quad - U(\alpha\mu) \left\{ T(\alpha) - \frac{\bar{c}}{\alpha^3} V(\alpha\beta) T[\alpha(1 - \beta)] \right\}, \\ \Delta_{\beta}^* &= V(\alpha\mu) \{ V[\alpha(\beta - \mu)] S(\alpha) - T[\alpha(1 - \mu)] U(\alpha\beta) \} + \\ &\quad + U(\alpha\mu) \{ T[\alpha(1 - \mu)] V(\alpha\beta) - V[\alpha(\beta - \mu)] T(\alpha) \}.\end{aligned}$$

Формы колебаний (20) вычисляются при $\alpha = \alpha_1$; α_1 является корнем частотного уравнения (19).

Функция Φ вычисляется по формуле (13) с учетом вида форм колебаний (17) или (20) в зависимости от взаимного расположения упругой опоры и массы контакта. Полученные соотношения позволяют рассматривать частные случаи: промежуточная опора отсутствует ($\bar{c} \equiv 0$); промежуточная опора является жесткой ($\bar{c} = \infty$).

3. Контактные пластины переменного сечения

Расчет предельных вибрационных перегрузок для контактных пластин переменного сечения проводится на основании вариационного метода Ритца [4], так как получить точное решение невозможно.

Форму собственных колебаний принимаем в виде

$$y(x) = \sum_{k=1}^N C_k \psi_k(x), \quad (21)$$

где $C_1 = 1$, C_k – произвольные постоянные. В качестве базисных функций принимаем формы собственных колебаний для контактной пластины постоянного поперечного сечения при заданном расположении упругой опоры и массы контакта. Такой подход позволяет достаточно точно описать формы колебаний контактной пластины переменного сечения и обеспечить высокую точность расчета.

В качестве базисных функций принимаем:

– при $\mu \geq \beta$:

$$\psi_k(x) = \begin{cases} y_1(x, \alpha_k) & \text{при } 0 \leq x \leq \beta, \\ y_2(x, \alpha_k) & \text{при } \beta \leq x \leq \mu, \\ y_3(x, \alpha_k) & \text{при } \mu \leq x \leq 1; \end{cases} \quad (22)$$

– при $\mu < \beta$:

$$\psi_k(x) = \begin{cases} y_1^*(x, \alpha_k) & \text{при } 0 \leq x \leq \mu, \\ y_2^*(x, \alpha_k) & \text{при } \mu \leq x \leq \beta, \\ y_3^*(x, \alpha_k) & \text{при } \beta \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (23)$$

Здесь базисные функции (22) и (23) определяются выражениями (17) и (20) при частотных коэффициентах α_k , которые являются корнями частотных уравнений (16) и (19) соответственно.

В соответствии с процедурой метода Рунге коэффициенты в (21) определим как ненулевое решение системы $(N-1)$ линейных алгебраических уравнений вида

$$\sum_{k=2}^N C_k (U_{jk} - \alpha^4 T_{jk}) = \alpha^4 T_{j1} - U_{jk} \quad (24)$$

при $j = 1, 2, 3, \dots, N-1$.

Коэффициенты U_{jk} и T_{jk} определяются выражениями

$$U_{jk} = \int_0^1 \bar{J}(x) \psi_j''(x) \psi_k''(x) dx + \bar{c} \psi_j(\beta) \psi_k(\beta), \quad T_{jk} = \int_0^1 \bar{F}(x) \psi_j(x) \psi_k(x) dx,$$

где индексы j и k принимают значения $j, k = 1, 2, 3, \dots, N$.

Частотные коэффициенты α в (24) соответствуют собственным частотам пластины переменного сечения и являются корнями частотного уравнения

$$|\alpha^4 T_{jk} - U_{jk}| = 0.$$

После определения постоянных C_k из (24) форма собственных колебаний контактной пластины (4) определяется с точностью до постоянной C , которая определяется из соотношения (10), а функция Φ определяется выражением (13) с учетом (21). Окончательные выражения для функции Φ , определяющей величину предельной виброперегрузки (12), существенно зависят от вида функции $\bar{J}(x)$, определяющей закон изменения момента инерции поперечного сечения контактной пластины по ее длине.

Интегрирование в выражении (13) производится на трех участках в соответствии с видом базисных функций и вариантом взаимного расположения массы контакта и промежуточной упругой опоры. Количество членов ряда (21) N в полученных соотношениях определяется требуемой точностью расчета.

Так как при вычислении функции Φ используются производные от базисных функций более высокого порядка, чем при вычислении частотных коэффициентов основной собственной частоты, то при сохранении постоянного числа членов ряда N в разложении (21) погрешность вычисления функции Φ будет больше, чем при вычислении частотного коэффициента α . Как показали конкретные расчеты, для достижения одинаковой относительной погрешности при вычислении функции Φ в разложении необходимо удерживать на один-два члена ряда больше, чем при вычислении частотного коэффициента α . Проведенные численные исследования показали, что при удержании в (21) не менее четырех членов ряда погрешность в вычислении функции Φ не превышает 3 %, что вполне допустимо для практических динамических расчетов контактных систем.

4. Численные исследования

На основании разработанных математических моделей были проведены численные исследования виброустойчивости контактных пластин в широком

диапазоне изменения их основных параметров. Ниже представлены некоторые результаты численных исследований.

На рис. 2 представлены зависимости частотного коэффициента α_1 для основной собственной частоты пластины в замкнутом состоянии при различных значениях параметров β , $\bar{c}$ и μ . На рис. 3 представлена зависимость α_1 от места расположения замкнутого контакта μ при $c = 0$, а на рис. 4 аналогичная зависимость для функции Φ , определяющей значение предельной виброперегрузки.

Полученные зависимости являются немонотонными, а значения предельной виброперегрузки существенно зависят от места расположения массы контакта. Максимальное значение предельной виброперегрузки, соответствующее минимуму Φ , достигается при параметрах контактной пластины, обеспечивающих максимальное значение собственной частоты изгибных колебаний. В частности, для рассматриваемой пластины максимальная предельная виброперегрузка обеспечивается при расположении замкнутого контакта в диапазоне $0,7 \leq \mu \leq 0,8$. Очевидно, для рассматриваемой конструкции пластины этот диапазон следует считать оптимальным с точки зрения ее виброустойчивости.

На рис. 5, 6 представлены аналогичные зависимости для трапецидальной в плане пластины, имеющей постоянную толщину. Коэффициент трапецидальности определялся как $q = 1 - b/b_0$, где b_0 и b – ширина пластины при $x = 0$ и $x = 1$ соответственно. Из полученных зависимостей следует, что трапецидальность также существенно влияет на величину предельной виброперегрузки. При этом увеличение коэффициента трапецидальности q при прочих равных условиях приводит к возрастанию собственной частоты и увеличению значения предельной виброперегрузки.

Для проверки предложенной математической модели расчета предельной виброперегрузки выполнен расчет виброустойчивости контактной пластины реле. Контактная пластина изготовлена из бериллиевой бронзы с модулем упругости $E = 1,3 \cdot 10^5$ МПа, удельным весом $\gamma = 8,3 \cdot 10^{-5}$ Н/мм³ и логарифмическим декрементом колебаний $\delta = 2,5 \cdot 10^{-2}$ [3]. Специальные демпфирующие устройства отсутствуют, т.е. $\psi_0 = 0$, а $\psi_M = 2\delta$. Контактная пластина имеет следующие геометрические размеры: $b = b_0 = 2$ мм; толщина $h = 0,135$ мм; $l = 10$ мм. Контакт массой $M = 0,01$ г расположен на конце контактной пластины ($\mu = 1$).

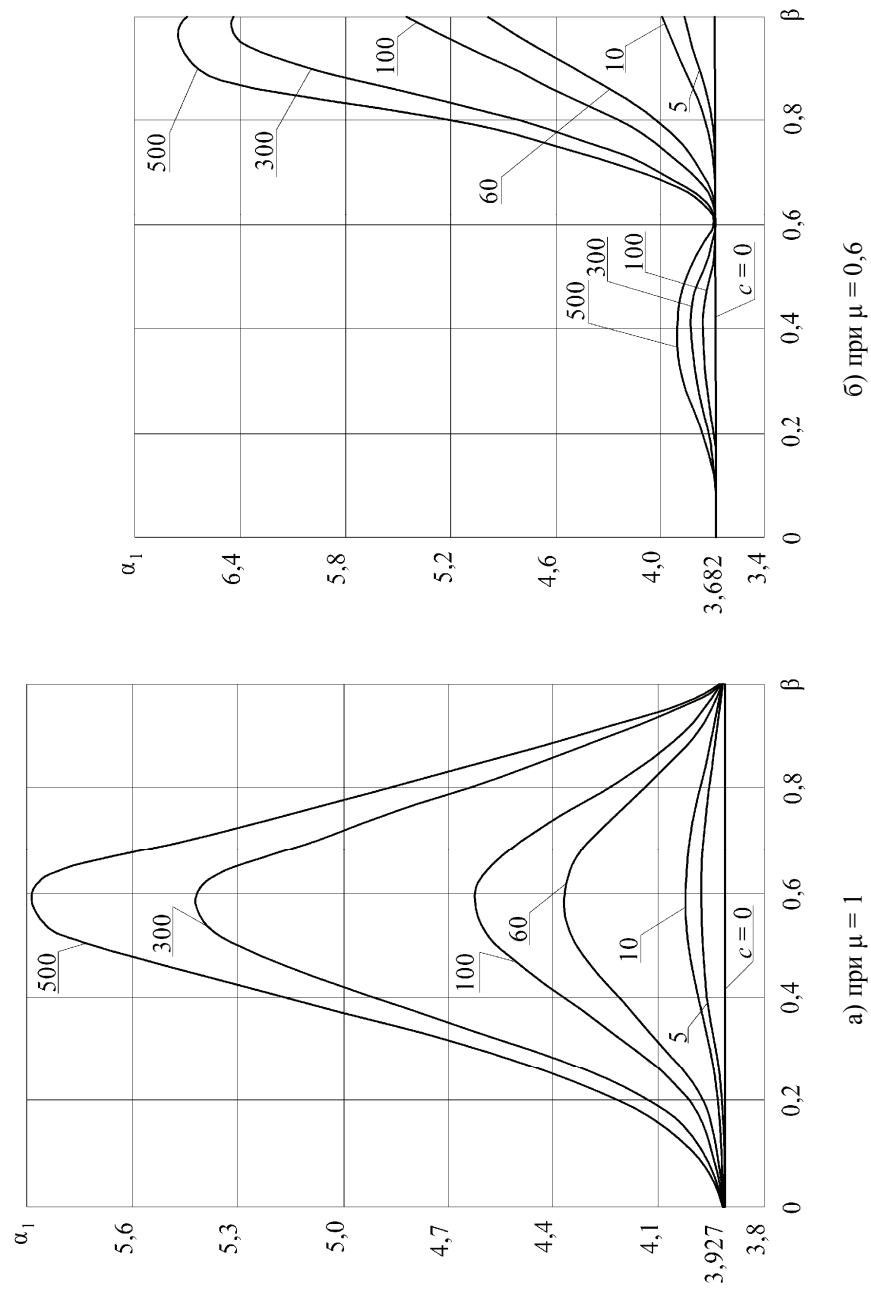
Расчет проведен для различных значений контактного усилия P_0 . Результаты расчета предельной виброперегрузки и результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения предельной виброперегрузки

Начальное контактное усилие P_0 , Н	Предельная виброперегрузка K_0 в единицах g	
	Расчет	Эксперимент
0,05	5,8	6
0,1	11,61	11,8
0,15	17,41	18

Из табл. 1 следует, что результаты расчетного и экспериментального определения предельной виброперегрузки удовлетворительно согласуются.



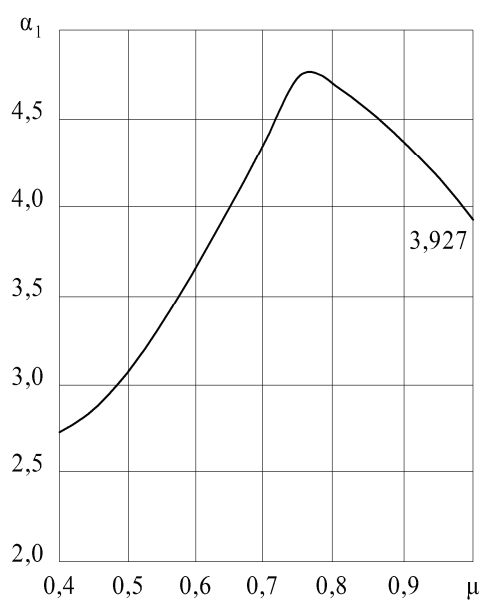


Рис. 3. Зависимость частотного коэффициента α_1 от μ

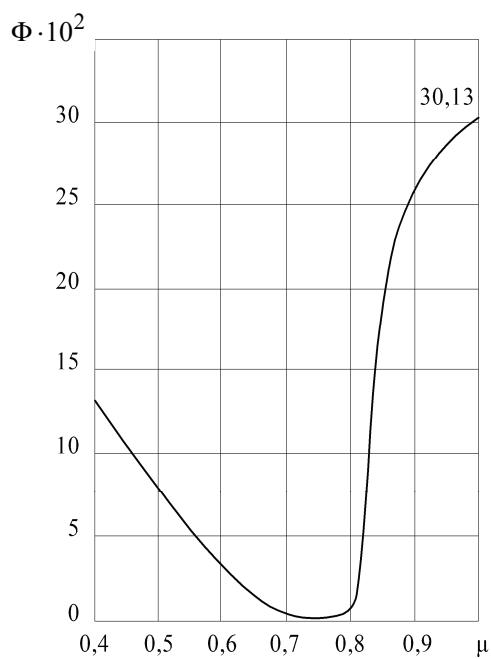


Рис. 4. Зависимость функции Φ от μ

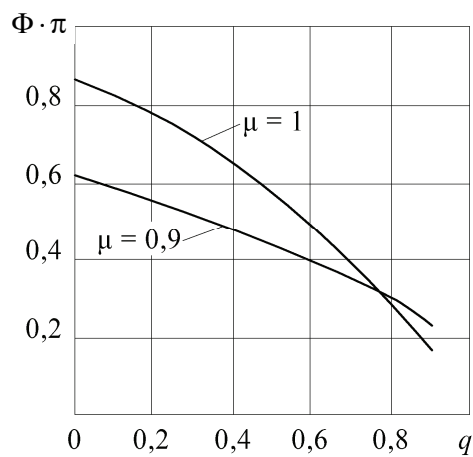


Рис. 5. Зависимость функции Φ от трапецеидальности контактной пластины

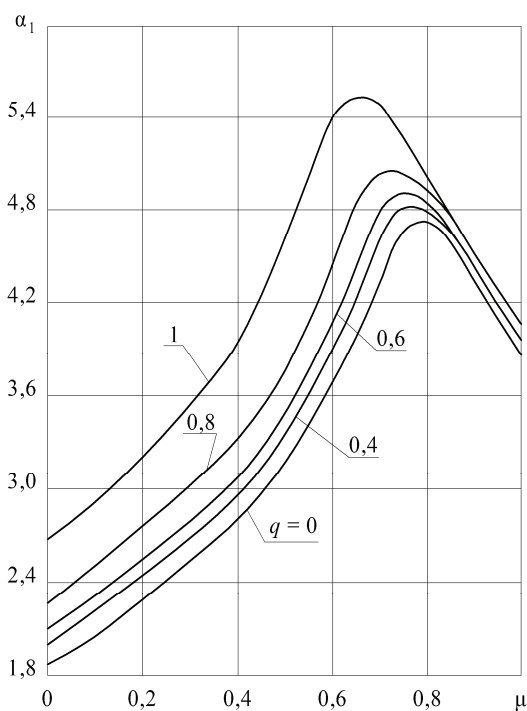


Рис. 6. Зависимость частотного коэффициента α_1 от μ и q

Заключение

Разработанная математическая модель позволяет исследовать виброустойчивость плоских контактных пластин переменного сечения, имеющих произвольно расположенные промежуточную упругую опору и массу контакта. Исследовано влияние параметров контактной системы на ее собственные частоты и величину предельных виброперегрузок для контактных пластин, находящихся в замкнутом состоянии. Показано, что существуют оптимальные параметры, позволяющие существенно повысить виброустойчивость контактных систем конструктивными методами. Все результаты исследований представлены в безразмерной форме, что позволяет использовать их в инженерной практике при проектировании виброустойчивых контактных систем.

Список литературы

1. **Ананьев, И. В.** Динамика конструкций летательных аппаратов / И. В. Ананьев, Н. М. Колбин, Н. П. Серебрянский. – М. : Машиностроение, 1972. – 416 с.
2. **Болотин, В. В.** К теории вибродемпфирующих полимерных покрытий / В. В. Болотин, А. Н. Литвинов // Механика полимеров. – 1978. – № 2. – С. 269–276.
3. **Писаренко, Г. С.** Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наукова думка, 1971. – 376 с.
4. **Бабаков, И. М.** Теория колебаний / И. М. Бабаков. – М. : Наука, 1965. – 560 с.

Волчихин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
ректор Пензенского государственного
университета

E-mail: cnit@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
rector of Penza State University

Литвинов Александр Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной
механики, Пензенский государственный
университет

E-mail: ryp@pnzgu.ru

Litvinov Alexander Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of theoretical
and applied mechanics,
Penza State University

УДК 621.888.4.001.2

Волчихин, В. И.

Моделирование динамических процессов контактных систем приборов / В. И. Волчихин, А. Н. Литвинов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 140–152.

В. И. Волчихин, Д. В. Артамонов, М. А. Чиркина

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ АВТОНОМНЫХ БЛОКОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Аннотация. Предложена методика использования автономных блоков для исследования волновых процессов в гетерогенных структурах автомобильных дорог при их динамическом нагружении колесами движущегося транспорта. Получены результаты математических расчетов влияния геометрии гетерогенной структуры на волновые процессы.

Ключевые слова: гетерогенные структуры, автономные блоки, дескрипторы, канал Флоке.

Abstract. The article suggests a method of applying self-contained units for investigation of highway surface heterogeneous structures under dynamic loading by wheels of moving transport. The authors have calculated the influence of heterogeneous structure geometry on wave processes.

Key words: heterogeneous structures, self-contained blocks, descriptors, Floke's channel.

Введение

Автомобильные дороги представляют собой гетерогенные структуры, составленные из слоев асфальтобетона, щебня, песка и подстилающего грунта. В многофазных структурах дороги возникают динамические нагрузки, связанные с движением колес транспортных средств по асфальтобетону. Эти нагрузки существенно увеличиваются на несплошностях поверхности дороги типа «просадки», «проломы», «выбоины», «поперечные трещины» и т.д.

Нагружение гетерогенной структуры дороги осуществляется ударами и давлением элементов протектора шины колеса по поверхности асфальтобетона (рис. 1).

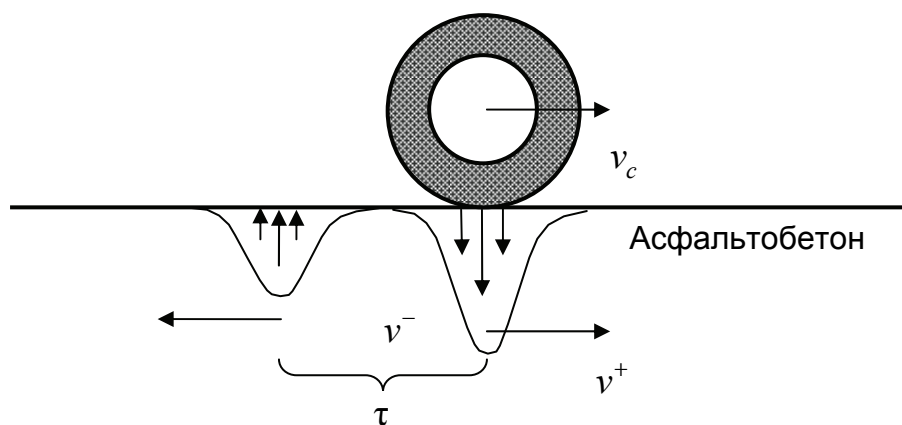


Рис. 1. Динамическое нагружение асфальтобетона: v_c – скорость автомобиля;

v^+ – скорость прямой волны; v^- – скорость отраженной волны;

τ – время задержки отраженной волны

В асфальтобетоне под колесом автомобиля возбуждается медленная поперечная волна, распространяющаяся в направлении движения автомобиля. Скорость распространения волны равна скорости движения автомобиля. Назовем эту волну прямой. С другой стороны ударами элементов протектора шины колеса будут возбуждаться упругие (акустические) волны, которые распространяются вовнутрь гетерогенной структуры дороги. Скорость распространения этих волн (1000–4000 м/с) примерно на два порядка больше скорости распространения прямой волны. Часть этой волновой энергии отразится от многофазной структуры дороги и вторично нагрузит область асфальтобетона под колесом автомобиля (рис. 1). Таким образом, вслед за прямой волной с временной задержкой τ будет распространяться вторая волна, у которой вектор скорости частиц среды имеет обратное направление по отношению к скорости частиц прямой волны. Назовем эту волну отраженной.

Целью работы является исследование отраженных волн для различных гетерогенных структур автомобильных дорог. Из автомобильных дорог, имеющих примерно одинаковые статические характеристики, деградировать от динамических нагрузок быстрее будут те, для структур которых волны отражения будут наибольшими.

1. Математическая модель гетерогенных структур автомобильных дорог

Математические модели гетерогенных структур автомобильных дорог будем строить с использованием декомпозиционного подхода. Область полотна автомобильной дороги (рис. 2) расчленим условными границами на автономные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов с упругим заполнением [1, 2]. В результате рекомпозиции дескрипторов автономных блоков получаем матрицу импеданса (математическую модель) гетерогенной структуры автомобильной дороги в базисах виртуальных каналов Флоке.

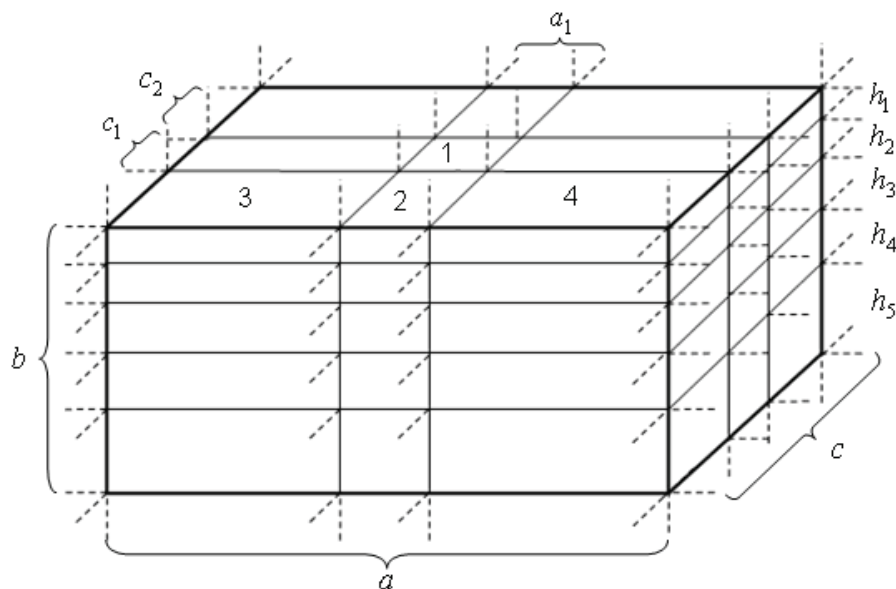


Рис. 2. Расчленение гетерогенной структуры автомобильной дороги на автономные блоки: h_1 , h_2 – асфальтобетон; h_3 – гравий; h_4 – песок; h_5 – уплотненный грунт; 1, 2, 3, ..., N – нумерация каналов Флоке автономных блоков на гранях

Запишем матрицу импеданса $\mathbf{Z}$ гетерогенной структуры автомобильной дороги в клеточной форме, выделив особо канал Флоке 1 (через него осуществляется динамическое нагружение колесом транспортного средства):

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{1\alpha} \\ \mathbf{Z}_{\alpha 1} & \mathbf{Z}_{\alpha\alpha} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\alpha = \{2, 3, \dots, N\}$ – совокупность индексов каналов 2, 3, ..., N .

Матрица импеданса связывает вектор $\mathbf{a}$ с вектором $\mathbf{b}$ [3]:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{1\alpha} \\ \mathbf{Z}_{\alpha 1} & \mathbf{Z}_{\alpha\alpha} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_\alpha \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Волновые процессы в гетерогенной структуре автомобильной дороги удобно описывать матрицей рассеяния $\mathbf{S}$, которая связана с матрицей импеданса $\mathbf{Z}$ следующим образом [2]:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{Z} + \mathbf{I})^{-1} \cdot (\mathbf{Z} - \mathbf{I}), \quad (3)$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица.

Матрица рассеяния существует, так как автономный блок записан в терминах собственных волн каналов Флоке, и она имеет структуру, аналогичную структуре матрицы импеданса:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{c}_1^- \\ \mathbf{c}_\alpha^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{11} & \mathbf{S}_{1\alpha} \\ \mathbf{S}_{\alpha 1} & \mathbf{S}_{\alpha\alpha} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1^+ \\ \mathbf{c}_\alpha^+ \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Амплитуды падающих волн $\mathbf{c}_1^+$, $\mathbf{c}_\alpha^+$ и амплитуды отраженных волн $\mathbf{c}_1^-$, $\mathbf{c}_\alpha^-$ в каналах Флоке определяются следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_1^+ &= \frac{\mathbf{b}_1 + \mathbf{a}_1}{2}, \quad \mathbf{c}_1^- = \frac{\mathbf{b}_1 - \mathbf{a}_1}{2}, \\ \mathbf{c}_\alpha^+ &= \frac{\mathbf{b}_\alpha + \mathbf{a}_\alpha}{2}, \quad \mathbf{c}_\alpha^- = \frac{\mathbf{b}_\alpha - \mathbf{a}_\alpha}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Динамическое нагружение колесом автомобиля гетерогенной структуры (рис. 2) осуществляется со стороны канала Флоке 1 амплитудой падающей волны $\mathbf{c}_1^+$; амплитуды остальных падающих волн в каналах математической модели гетерогенной структуры равны нулю ($\mathbf{c}_\alpha^+ = 0$). В этих каналах распространяются только уходящие волны, возбужденные динамической нагрузкой (колесом автомобиля) со стороны канала Флоке 1. Амплитуда падающей волны $\mathbf{c}_1^+$ определяется векторами $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{b}_1$. Компонентами вектора $\mathbf{a}_1$ являются коэффициенты рядов Фурье [1] представления нормальной и касательной составляющих скорости частиц. Компонентами вектора $\mathbf{b}_1$ являются коэффициенты рядов Фурье представления давления и касательной

составляющей вихря скорости частиц. Следовательно, можно проводить комплексное нагружение гетерогенной структуры (скорость частиц, давление, вихрь скорости частиц). При нагружении гетерогенной структуры колесом транспортного средства доминирующими являются нормальная составляющая скорости частиц $\vec{v}^z$ и давление p . Остальные компоненты векторов $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{b}_1$, представляющие касательные составляющие скорости частиц и вихря скорости частиц, принимаем равными нулю.

Зная амплитуду падающей волны ($c_1^+ \neq 0$, $c_\alpha^+ = 0$), по (4) определяем амплитуды отраженных волн (c_1^- , c_α^-) в каналах Флоке базового элемента гетерогенной структуры. Среда заполнения каналов Флоке имеет параметры ρ (плотность), c_l , c_τ (скорости распространения продольных и поперечных упругих волн). Эти параметры выбираем, учитывая физические свойства материалов гетерогенной структуры автомобильной дороги. Через канал Флоке 1 осуществляется динамическое нагружение гетерогенной структуры колесом автомобиля, следовательно, параметры ρ , c_l , c_τ берем для резины. Для остальных каналов, находящихся сверху структуры, параметры ρ , c_l берем для воздуха. Для каналов, находящихся снизу структуры, параметры ρ , c_l , c_τ берем для слоев дорожной одежды. Для боковых каналов структуры параметры выбираем следующим образом: первый слой – ρ , c_l , c_τ – для асфальта; второй слой – ρ , c_l , c_τ – для асфальта; третий слой – ρ , c_l , c_τ – для гравия; четвертый слой – ρ , c_l , c_τ – для песка; пятый слой – ρ , c_l , c_τ – для уплотненного грунта.

2. Результаты математического моделирования

В табл. 1 приведены усредненные значения плотности, модуля Юнга и модуля сдвига для материалов, которые используются при строительстве автомобильных дорог.

Таблица 1

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Модуль Юнга, E , МПа	Модуль сдвига, G , МПа
Асфальтобетон	3000	4400	2400
Гравий	2500	1500	1750
Песок	1800	750	850
Уплотненный грунт	1500	300	600
Грунт	1300	150	450

Скорости распространения продольных и поперечных упругих волн определяются следующим образом: $c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, $c_\tau = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$.

На рис. 3 представлены характерные конструкции многослойных гетерогенных структур дорог.

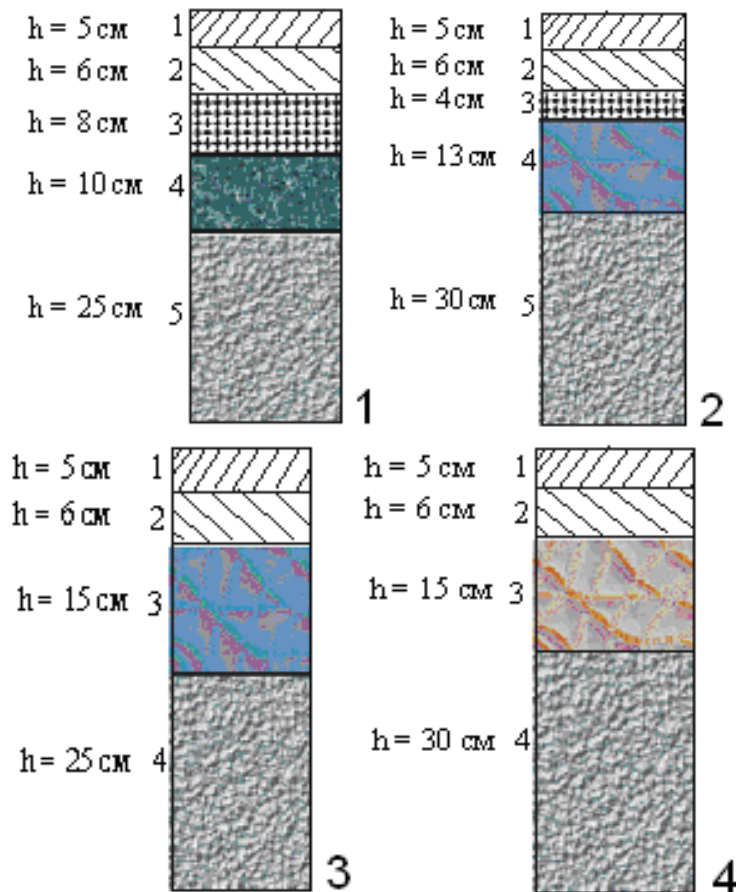


Рис. 3. Характерные конструкции многослойных гетерогенных структур дорог

На рис. 4 показаны результаты расчета коэффициента отраженной волны в зависимости от частоты динамического нагружения.

Коэффициент отражения определялся как $k_{\text{отр}} = \frac{c_1^-}{c_1^+}$, где c_1^+ – амплитуда

прямой волны; c_1^- – амплитуда отраженной волны. Из графиков на рис. 4 следует, что наиболее жесткая «волновая подушка» у конструкции 1. Для скоростей автомобилей не более 60 км/ч (из технических характеристик спектр частот не превышает 400 Гц) коэффициент отражения у всех четырех конструкций примерно одинаковый и не превышает $k_{\text{отр}} = 0,25$.

На рис. 5 приведены результаты математического расчета распределения давления для прямой волны по глубине гетерогенной структуры автомобильной дороги конструкции 1.

Для больших частот, которые характерны для скоростных режимов движения транспортных средств, наблюдаются значительные изменения давления на границах раздела сред асфальтобетон – гравий, гравий – песок, песок – уплотненный грунт. Быстрые изменения давления приводят к увеличению скорости частиц среды на границе раздела, а это ведет к дополнительным разрушениям гетерогенной структуры автомобильной дороги.

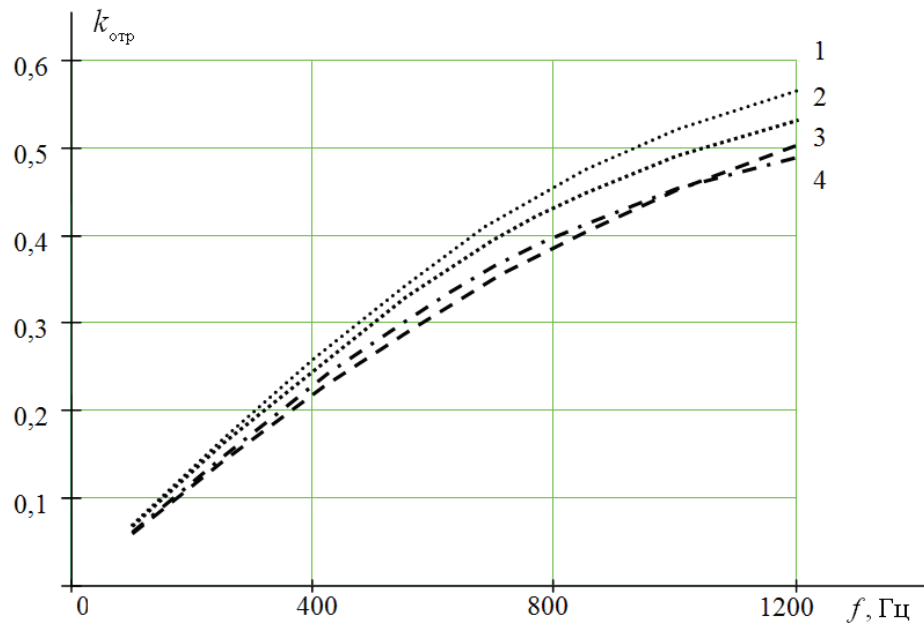


Рис. 4. Зависимость коэффициента отраженной волны от частоты динамического нагружения для каждой из конструкций (рис. 3)

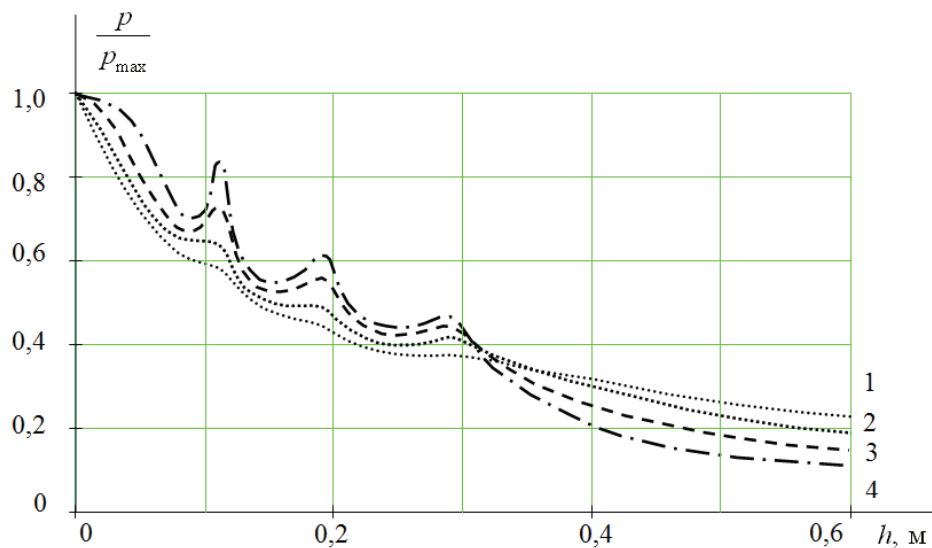


Рис. 5. Распределение давления для прямой волны по глубине гетерогенной структуры конструкции 1: кривые 1 – $f = 100$ Гц; 2 – $f = 400$ Гц; 3 – $f = 800$ Гц; 4 – $f = 1200$ Гц

Заключение

Метод автономных блоков позволяет строить адекватные математические модели гетерогенных структур автомобильных дорог и проводить теоретические исследования различных волновых процессов, протекающих в этих структурах при динамических нагружениях.

Список литературы

1. **Голованов, О. А.** Математическое моделирование волновых процессов в акустических устройствах на основе декомпозиционного алгоритма / О. А. Голованов, В. В. Смогунов, А. И. Грачев // Вестник Пермского университета. Математика, механика, информатика. – 2008. – № 4 (20). – С. 92–101.
2. **Кичкидов, А. А.** Математическое моделирование распространения и затухания волновых процессов в двухфазовых гетерогенных структурах методом автономных блоков / А. А. Кичкидов, О. А. Голованов, А. А. Туманов, А. М. Мазур // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 4. – С. 17–21.
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.

Волчихин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
ректор Пензенского государственного
университета

E-mail: cnit@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
rector of Penza State University

Артамонов Дмитрий Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
директор Межрегионального центра
повышения квалификации, Пензенский
государственный университет

E-mail: dvamrcpk@pnzgu.ru

Artamonov Dmitry Vladimirovich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, director of Interregional
Center of Advanced Studies,
Penza State University

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

УДК 535.32

Волчихин, В. И.

Теоретическое исследование методом автономных блоков волновых процессов в гетерогенных структурах при динамических нагрузках / В. И. Волчихин, Д. В. Артамонов, М. А. Чиркина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 153–159.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПОСЛЕ РАЗРУШЕНИЯ

Аннотация. Исследованы рабочие лопатки турбины высокого давления газоперекачивающего агрегата после его аварийной остановки. Определены причины разрушения рабочих лопаток на основании комплексного исследования микроструктуры и механических свойств.

Ключевые слова: рабочие лопатки турбин, микроструктура металла, механические свойства, никелевые сплавы, упрочняющие фазы.

Abstract. The authors have researched the rotor blades of a high-pressure turbine in a gas-compressor unit after its emergency stop. The researchers have determined the causes of blades' destruction on the basis of microstructure and mechanical characteristics examination.

Key words: turbine rotor blades, metal microstructure, mechanical features, nickel alloys, strengthening phase.

Введение

Лопатки турбины высокого давления (ТВД) газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов могут длительное время (десяtkи тысяч часов) эксплуатироваться при высокой температуре $\sim 900^\circ\text{C}$ в условиях агрессивной среды. При этом в материале лопаток неизбежно происходят структурно-фазовые изменения, которые влияют на их работоспособность. Данные изменения сопровождаются разнообразием видов повреждений материала лопаток как на микро-, так и на макроуровне [1, 2].

Целью работы являлось исследование состояния материала лопаток ТВД из аварийного комплекта и установление причины их разрушения.

В качестве объекта исследования была выбрана лопатка с типичной картиной разрушения из комплекта после аварийного останова ротора турбины газоперекачивающего агрегата. Нарботка лопаток составляла 70 ч после планового ремонта. Лопатки импортного производства из жаропрочного никелевого сплава In 738 были восстановлены в производственных условиях.

1. Материал и методика исследования

Для выявления причин разрушения были проведены исследования микроструктуры, фазового состава, микротвердости, прочностных и пластических характеристик материала лопатки.

Механические испытания на растяжение проводили на разрывной машине У10Т в соответствии с ГОСТ1497. Микроструктуру и тонкую структуру шлифов исследовали на оптическом микроскопе «НЕОФОТ-32» и растровом электронном микроскопе «VEGA//TESCAN». Рентгеноструктурный анализ осуществляли на дифрактометре Дрон-3М с применением $\text{Cu-K}\alpha$ -излучения. Контрольный химический анализ осуществляли атомно-эмиссионным методом на спектрографе PGS-2. Микротвердость материала измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 2 Н.

2. Результаты исследований и их обсуждение

При визуальном осмотре на всех рабочих лопатках ТВД выявлены разрушения верхней части пера по входной кромке 0,2–0,3 высоты пера с выходом на торцы, наблюдается скол вершины пера лопаток со стороны входной кромки. Внешний вид рабочих лопаток показан на рис. 1.

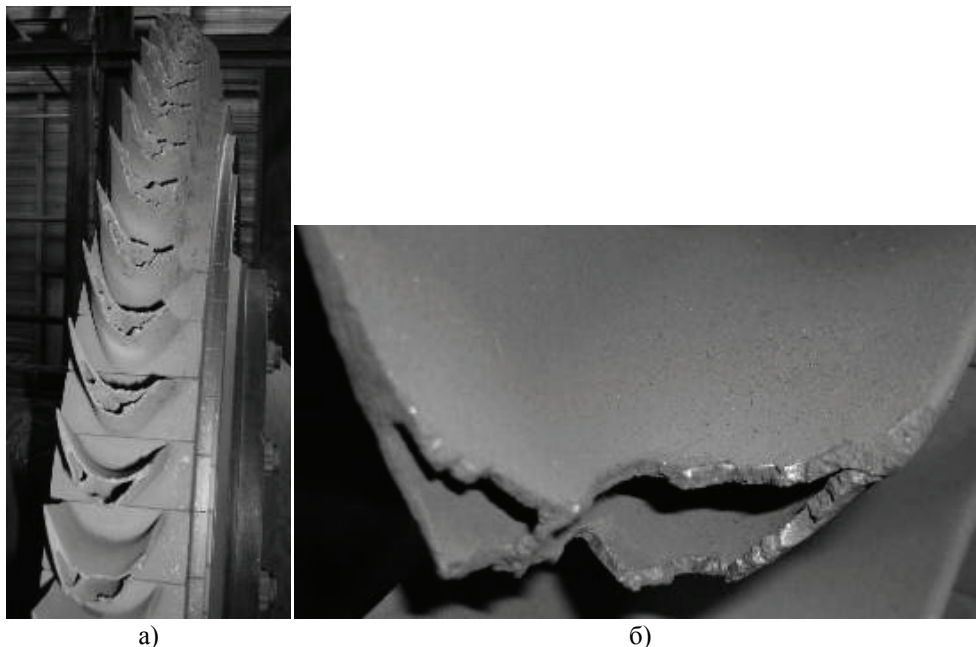


Рис. 1. Вид перовой части лопаток ТВД после аварии: а – общий вид в сборке; б – вид поверхности излома пера исследуемой лопатки

На рис. 1,б представлен вид поверхности излома исследованной лопатки. Поверхность разрушения окислена, имеет механические повреждения в виде забоин. Кромки пера в зоне разрушения на спинке и корыте имеют загибы до 2 мм и утяжку в сторону корыта, т.е. в направлении, противоположном вращению ротора турбины. Вид излома смешанный – межкристаллитный и транскристаллитный, «хрупко-вязкий».

Цвет поверхности верхней половины пера лопатки – черно-бурый, а нижней части – ржаво-коричневый, что свидетельствует о высокотемпературном нагреве вершины пера.

Аналогичная картина разрушения лопаток ТВД наблюдалась на другом агрегате. Характер разрушения на всех лопатках идентичен: наблюдается скол вершины пера лопаток со стороны входной кромки. Нарботка данного комплекта лопаток ТВД составляла 515 ч. Лопатки были изготовлены из никелевого сплава ЗМИ-3У методом точного литья по выплавляемым моделям.

Материал лопатки практически соответствует марочному составу сплава In 738 за исключением повышенного содержания легирующих элементов Cr, Co, W, что не снижает жаропрочных и эксплуатационных свойств данного сплава.

При небольшом времени наработки (70 и 515 ч) лопатки обоих комплектов имеют аналогичные картины разрушения перовой части всех лопаток

комплекта и не подлежат восстановлению. Это свидетельствует о внешнем силовом воздействии, которое привело к разрушению. Если предположить, что разрушение материала произошло вследствие деградации структуры, то будет наблюдаться индивидуальный профиль излома на каждой лопатке. Пример такого разрушения лопаток ТВД от высокотемпературной усталости после (~10 000 ч) представлен на рис. 2.

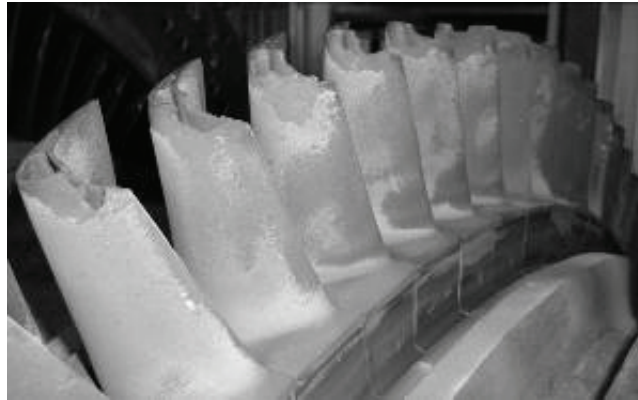


Рис. 2. Вид усталостного разрушения лопаток ТВД

Значения механических характеристик материала исследуемых рабочих лопаток ТВД из сплава In738 представлены в табл. 1. Результаты испытаний образцов, вырезанных из разных зон опытной лопатки, по всем показателям соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к данной марке сплава.

Таблица 1
Механические свойства материала (In 738) лопатки ТВД

Образец (место)	Предел прочности (σ_B), МПа	Предел текучести ($\sigma_{0.2}$), МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
Перовая часть	860	700	4	—
Замковая часть	850	610	8,8	11
По ТУ 3117-002-57175179-2001	800	700	3	—

При исследовании материала лопатки на оптическом микроскопе после травления реактивами «Марбле» и «Царская водка» выявлена микроструктура основного металла лопатки в вершине пера и в замковой части.

Структура металла – литая, крупнозернистая, равноосная. Она представлена γ -твердым раствором легирующих элементов в никеле, γ' -упрочняющей интерметаллидной фазой $Ni_3(AlTi)$ и карбидом MeC. Карбидная фаза имеет высокую дисперсность, расположена как по границам, так и внутри зерен в виде прерывистой сетки или скоагулированных выделений (рис. 3).

На рис. 4 показана тонкая структура металла замковой части лопатки ТВД. Она представляет собой аустенитную основу и когерентно связанную с ней интерметаллидную γ' -фазу $Ni_3(AlTi)$ в виде частиц шаровидной формы

размером от 500 до 1000 нм. Объемное содержание γ' -фазы в металле шлифа, определенное точечным методом А. А. Глаголева, составляет $\sim 37\%$. Это соответствует кондиционной микроструктуре никелевого сплава In 738 в состоянии после термической обработки – закалки и старения.

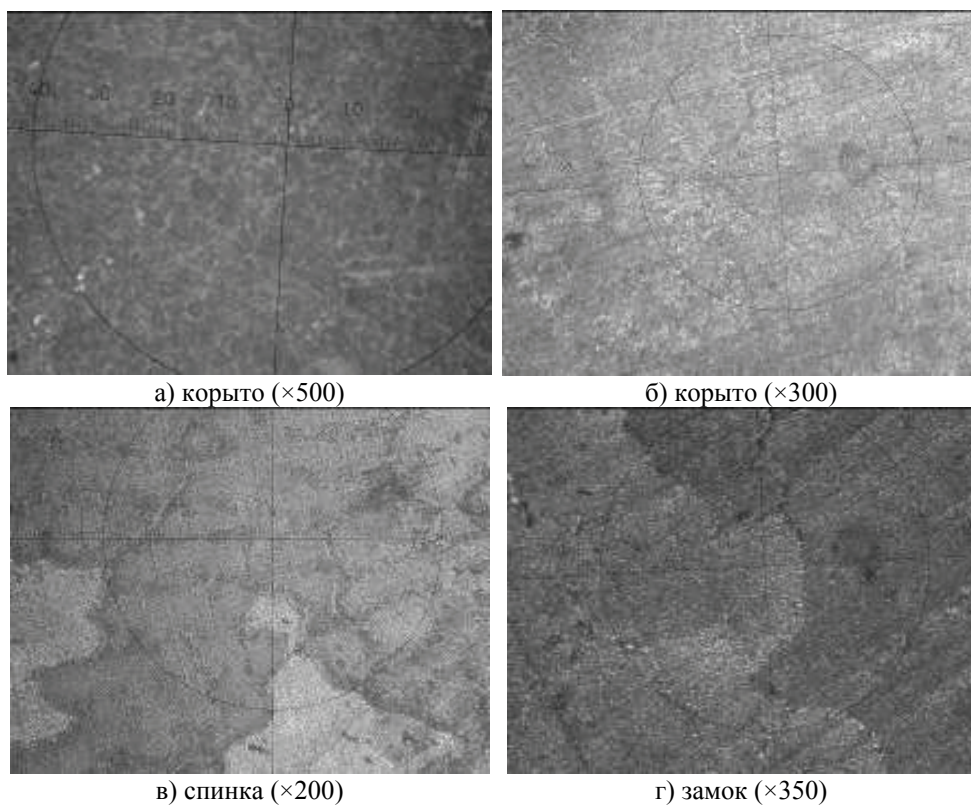


Рис. 3. Микроструктура материала In 738 лопатки ТВД

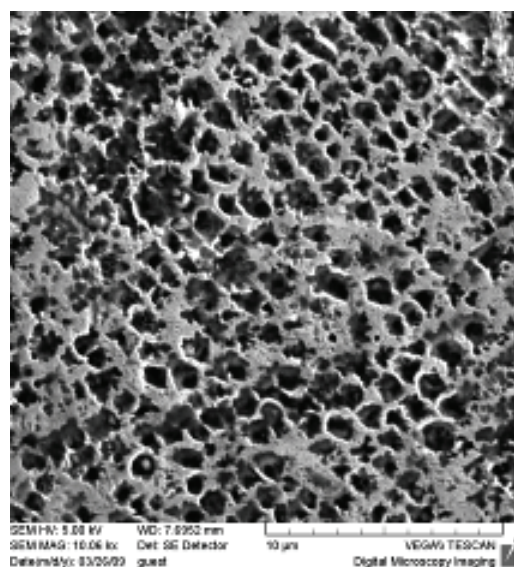


Рис. 4. Тонкая структура материала лопатки, замок ($\times 10000$)

На рис. 5 представлена тонкая структура металла в вершине перовой части лопатки со стороны спинки (рис. 5,а) и со стороны корыта (рис. 5,б). Структура состоит из двух фаз – основной составляющей в виде аустенитной γ -фазы и избыточной интерметаллидной γ' -фазы $\text{Ni}_3(\text{AlTi})$. Интерметаллидная фаза выявляется в виде крупнодисперсных частиц шаровидной и эллипсоидной форм размером 46–1080 нм и мелкодисперсных выделений размером 180–270 нм. Объемное содержание γ' -фазы в металле, рассчитанное точечным методом А. А. Глаголева, составляет: со стороны спинки ~33 %, со стороны корыта ~32 %. При этом соотношение крупнодисперсной и мелкодисперсной γ' -фазы в шлифе составляет, соответственно, со стороны спинки: ~15 и ~18 %, со стороны корыта: ~12 и ~20 %.

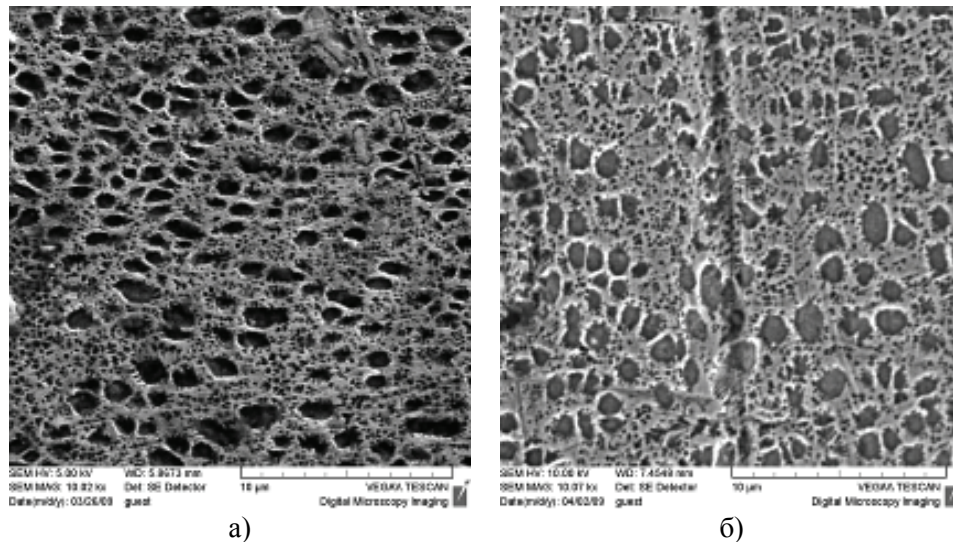


Рис. 5. Тонкая структура материала лопатки в вершине пера:
а – со стороны спинки; б – со стороны корыта ($\times 10000$)

Характерное разнoзернистое строение интерметаллидной γ' -фазы в металле вершины пера лопатки объясняется нарушением теплового режима работы турбоагрегата, с чем связан нагрев верхней половины перовой части до температуры 1000–1100 °С. В связи с высокотемпературным перегревом вершины пера произошло частичное растворение интерметаллидной γ' -фазы в твердом растворе аустенита. В процессе охлаждения материала лопаток с высоких температур (> 1000 °С) при остановке агрегата происходило выделение мелкодисперсной интерметаллидной фазы из твердого раствора, как и положено по кинетике распада пересыщенной γ -фазы.

Незначительная разница в соотношениях крупно- и мелкодисперсных выделений γ' -фазы в сплаве со стороны спинки и корыта связана с температурным градиентом при нагреве данных зон. Материал в вершине лопатки со стороны корыта при работе был подвергнут более интенсивному перегреву.

Методом рентгеноструктурного анализа определены фазовый состав и параметры субструктуры основного материала лопатки. Основными фазами в исследуемом сплаве являются γ -твердый раствор легирующих элементов (~63 %) и упрочняющая интерметаллидная фаза $\text{Ni}_3(\text{AlTi})$ (~37 %). Также за-

фиксировано наличие карбидной фазы (W, Mo)C. Субзеренная структура сплава характеризуется крупным размером блоков мозаики ($D \geq 500$ нм) и высокими значениями микродеформаций в них ($\epsilon = 0,00118$ и $\epsilon = 0,00178$ в зоне замка и пера со стороны спинки соответственно). Плотность дислокаций на границах и внутри блоков составляет $\rho_\epsilon = 7,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и $\rho_\epsilon = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Субструктура материала со стороны корыта отличается очень малым размером блоков мозаики ($D = 27$ нм) и величины микродеформаций ($\epsilon = 0,00002$). Плотность дислокаций по границам субзерен имеет предельное значение ($\rho_L = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), характерное для стадии разрушения материала. Такая фрагментированная субструктура материала может формироваться при фрикционном взаимодействии с большими контактными нагрузками. В пользу высказанного предположения свидетельствует и появление текстуры в кристаллографических плоскостях (2 0 0) зерен никелевой матрицы (по данным рентгеноструктурного анализа).

При измерении микротвердости материала на шлифах, вырезанных из вершины пера и замка лопатки, установлено, что твердость сплава адекватна его структурно-фазовому состоянию и равна: $H_{200} = 3,76 \cdot 10^3$ Мпа (спинка); $H_{200} = 3,9 \cdot 10^3$ Мпа (корыто); $H_{200} = 4,8 \cdot 10^3$ Мпа (замок).

Заключение

На основании комплексного исследования материала разрушенной лопатки турбины высокого давления газоперекачивающего агрегата установлено:

1. Структурно-фазовое состояние материала лопатки в зонах, не подверженных высокотемпературному воздействию (> 1000 °C), кондиционно и соответствует состоянию после восстановительной термической обработки (закалки и старения при 850 °C).

2. В зоне разрушения (вершине пера) установлены структурно-фазовые изменения в материале, заключающиеся в частичном растворении существующей γ' -фазы и образовании вновь высокодисперсной γ' -фазы.

3. Механические свойства материала лопатки в перовой и хвостовой частях соответствуют требованиям «Технического задания на восстановленные лопатки ТВД».

4. Разрушение лопаток произошло по кратковременному типу в связи с «тепловым ударом» в горячей зоне проточной части турбины. После разрушения лопатки определенное время находились в рабочих условиях.

5. Причиной разрушения лопаток явилось внешнее механическое воздействие со стороны обводного кольца (обода) корпуса турбины на плоскую поверхность вершины пера в зоне входной кромки вследствие температурного расширения лопаток при нагреве их верхней части до (1000–1100) °C и возможного смещения оси ротора турбины относительно оси корпуса турбины (проседание ротора).

Список литературы

1. **Гецов, Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин / Л. Б. Гецов. – Рыбинск : Газотурбинные технологии, 2010. – Кн. 1. – 611 с.
2. **Филатов, М. А.** Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов / М. А. Филатов, В. С. Судаков // МиТОМ. – 1995. – № 6. – С. 12–15.

3. **Тарасенко, Ю. П.** Определение перспективы дальнейшего использования рабочих лопаток ТВД после эксплуатации в течение двух назначенных сроков и промежуточного / Ю. П. Тарасенко, В. А. Сорокин, О. Б. Бердник, Л. А. Кривина // Фундаментальные проблемы машиноведения. Новые технологии и материалы : сборник научных трудов. – Нижний Новгород, 2006. – С. 104.

Тарасенко Юрий Павлович

кандидат физико-математических наук,
Нижегородский филиал Учреждения
Российской академии наук
Института машиноведения имени
А. А. Благонравова РАН
(г. Нижний Новгород)

E-mail: tribonikanpc@mail.ru

Tarasenko Yuriy Pavlovich

Candidate of physical and mathematical
sciences, Nizhny Novgorod branch
of the Russian Academy of Sciences
Establishment "Institute of Engineering
Science named after A. A. Blagonravov"
(Nizhny Novgorod)

Бердник Ольга Борисовна

кандидат технических наук,
Нижегородский филиал Учреждения
Российской академии наук
Института машиноведения имени
А. А. Благонравова РАН
(г. Нижний Новгород)

E-mail: tribonikanpc@mail.ru

Berdnik Olga Borisovna

Candidate of engineering sciences,
Nizhny Novgorod branch of the Russian
Academy of Sciences Establishment
"Institute of Engineering Science
named after A. A. Blagonravov"
(Nizhny Novgorod)

Царева Ирина Николаевна

кандидат физико-математических наук,
Нижегородский филиал Учреждения
Российской академии наук
Института машиноведения имени
А. А. Благонравова РАН
(г. Нижний Новгород)

E-mail: tribonikanpc@mail.ru

Tsaryova Irina Nikolaevna

Candidate of physical and mathematical
sciences, Nizhny Novgorod branch
of the Russian Academy of Sciences
Establishment "Institute of Engineering
Science named after A. A. Blagonravov"
(Nizhny Novgorod)

УДК 621

Тарасенко, Ю. П.

Структурно-фазовое состояние и механические свойства материала лопатки турбины высокого давления после разрушения / Ю. П. Тарасенко, О. Б. Бердник, И. Н. Царева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 160–166.

УДК 621.923

В. З. Зверовщиков, А. В. Соколов

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОФИЛЬНОМ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Аннотация. Предложен новый способ повышения размерной стойкости профильных алмазных шлифовальных кругов на металлических связках и разработана эффективная технология врезного шлифования деталей алмазными кругами с электроэрозионной стабилизацией рельефа рабочей поверхности инструмента. Определены параметры электрических импульсов, повышающие эффективность электроэрозионного шлифования.

Ключевые слова: электрическая эрозия, профиль, алмазный шлифовальный круг, шлифование, энергия импульса, электрический разряд.

Abstract. The authors suggest a new method of improving the dimensional stability of shaped diamond grinding wheels on metal bundles and an effective technology of plunge grinding of parts by diamond wheels with electroerosive stabilization of the tool working surface relief. The article determines the electric impulses' parameters, which increase efficiency of electroerosive grinding.

Key words: electric erosion, a profile, diamond grinding wheel, grinding, pulse energy, electric discharge.

Введение

Возрастающие требования к долговечности и износостойкости деталей делают актуальной задачу формирования наиболее нагруженных поверхностных слоев с заданными эксплуатационными характеристиками при финишной обработке. Проблемный характер носит обработка сложных по форме поверхностей деталей из твердых сплавов и неметаллических материалов (керамики, ферритов) профильными алмазными кругами.

Обработка сложнопрофильными алмазными инструментами обеспечивает многократное повышение производительности по сравнению с традиционным шлифованием деталей на копировально- или оптикошлифовальных станках. Высокая стойкость инструмента обеспечивает стабильность размеров и геометрической формы для большой партии обрабатываемых деталей.

Однако использование фасонных кругов для профильного шлифования связано со значительными трудностями, возникающими при профилировании стандартных алмазных кругов, так как сложно обеспечить точностные параметры круга при электроэрозионном воздействии на алмазосодержащий слой. Для изготовления прецизионных деталей машиностроения и фасонных режущих инструментов, например резцов, точность не может стабильно обеспечиваться электроэрозионным профилированием.

Кроме того, при шлифовании фасонных поверхностей деталей происходит неравномерный износ шлифовального круга на различных участках профиля вследствие неодинаковых силовых и тепловых нагрузок. Поэтому для достижения высоких точностных параметров шлифуемых деталей необходимо стабилизировать форму режущего контура, образованного рабочей поверхностью круга, и создать условия равномерного износа инструмента на различных участках фасонного профиля, чтобы избежать искажения формы обработанных деталей.

1. Новый способ получения профильных алмазных кругов на металлических связках

Для повышения эффективности шлифования сложнопрофильных поверхностей деталей нами предложено формировать профильные шлифовальные круги на металлических связках за две технологические операции [1]. На первой операции осуществляют предварительное электроэрозионное профилирование, а на второй – окончательное формирование профиля круга пластическим деформированием накатным роликом. Электроэрозионное профилирование приводит к снижению внутренних напряжений в металлической связке алмазного круга, однако не позволяет получить высокую точность линейных и угловых размеров профиля. При окончательном формообразовании профиля круга накатным роликом погрешность линейных размеров не превышает 10 мкм вследствие выравнивания режущего контура из алмазных зерен поверхностью накатного ролика и повышения размерной стойкости круга за счет возникновения упрочненного слоя в поверхностных слоях металлической связки.

Чтобы избежать перенаклепа и разрушения металлической связки круга, силу воздействия стального ролика на алмазоносный слой при накатывании рекомендуется ограничивать соотношением

$$P \leq \frac{D_{\text{кр}} b q^2}{0,126 E \left(\frac{D_{\text{кр}}}{d_p} + 1 \right)},$$

где $D_{\text{кр}}$ – наружный диаметр шлифовального круга, мм; b – ширина контакта круга с накатным роликом, мм; q – максимальное давление при накатывании, $q = (1,8 \dots 2,2) \sigma_T$ (σ_T – предел текучести материала связки, МПа); d_p – наружный диаметр накатного ролика, мм; E – модуль упругости материала связки, МПа.

Для повышения точности профилирования и уменьшения величины упругого возврата материала связки при накатывании количество циклов деформирования должно быть таким, чтобы приращение пластической деформации после определенного числа циклов прекращалось. Установлено, что количество циклов накатывания следует ограничивать диапазоном от 10 до 15. Дальнейшее увеличение числа циклов может привести к перенаклепу и нарушению целостности алмазоносного слоя вследствие появления трещин и частичного разрушения металлической связки.

Эффективность упрочнения связки при профилировании накатным роликом можно повысить за счет использования жировых смазок и добавления в них поверхностно-активных веществ. В результате снижается коэффициент трения между контактирующими поверхностями ролика и алмазоносного слоя шлифовального круга, а также проявляется эффект адсорбционного пластифицирования материала связки, что позволяет понизить его прочностные характеристики и облегчить деформацию при накатывании роликом.

2. Исследование эффективности нового способа повышения размерной стойкости профильных алмазных кругов

Для оценки влияния глубины упрочненного слоя при накатывании на закрепление алмазных зерен в алмазоносном слое круга был использован ме-

тод трехмерного моделирования в программной среде Solidworks. Алмазное зерно аппроксимировалось формой шара и нагружалось силами, которые действуют на зерна круга при шлифовании.

Построение конечно-элементной модели позволило получить картину распределения напряжений в материале связки круга вокруг единичного алмазного зерна при различной глубине упрочнения связки накатыванием стальным роликом алмазоносного слоя.

Программный модуль CosmosWorks позволил провести оценку способности материала связки сопротивляться усталостному разрушению при циклическом изменении силы резания на участках, прилегающих к алмазному зерну.

Результаты моделирования показали, что способность металлической связки алмазного круга удерживать зерна и сопротивляться циклическим нагрузкам при шлифовании возрастает до 30 % после накатывания алмазоносного слоя роликом (рис. 1).

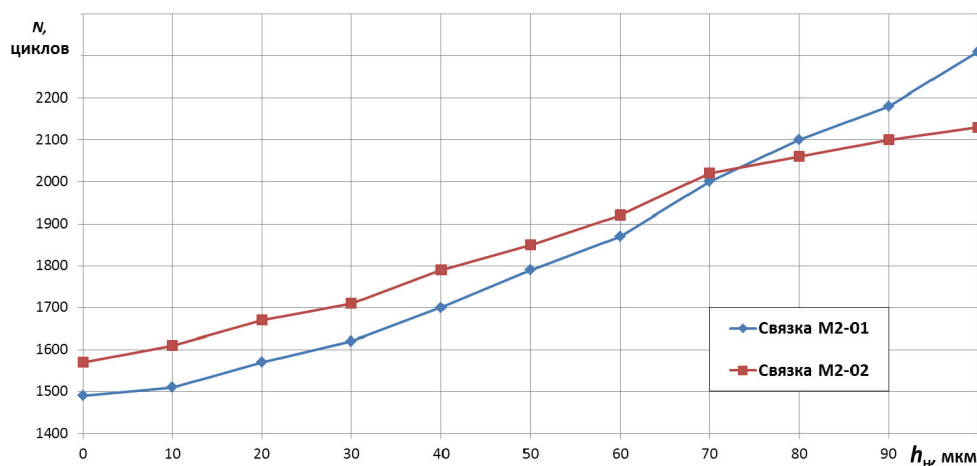


Рис. 1. Расчетная зависимость влияния глубины h_H упрочненного слоя на способность связки сопротивляться циклическому нагружению и удерживать алмазные зерна

Значения шероховатости обработанной поверхности при врезном шлифовании образцов из твердого сплава ВК6 кругами после электроэрозионного профилирования и последующего накатывания алмазоносного слоя стальным роликом представлены в табл. 1. Измерение шероховатости проводилось на профилографе-профилометре «Сейтроник ПШ8-4».

Таблица 1

Значения шероховатости обработанной поверхности при шлифовании твердого сплава ВК6 алмазными кругами на связке M1 различной зернистости

Зернистость	Шероховатость поверхности R_a , мкм	
	Шлифование кругом после электроэрозионного профилирования	Шлифование накатанным кругом
80/63	0,58	0,47
100/80	0,75	0,63
125/100	0,92	0,75

Исследования показали, что при прочих равных условиях шлифование алмазными кругами, окончательно спрофилированными накатыванием, позволяет получать меньшую шероховатость поверхности. Это обусловлено тем, что формирование шлифованной поверхности происходит вследствие переноса режущего контура, образованного алмазными зернами круга, на поверхность обрабатываемого изделия. Обычно при шлифовании непосредственно в процессе резания участвует лишь 10–12 % зерен, находящихся на поверхности круга, а накатывание профиля круга стальным роликом существенно повышает количество режущих зерен вследствие образования более плотного режущего контура за счет утапливания алмазных зерен в материал связки. Это увеличивает вероятность перекрытия царапин, производимых отдельными зернами, и приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности.

Таким образом, алмазные инструменты, изготовленные по предложенной технологии, могут быть рекомендованы для использования на операциях чистового шлифования, где основным требованием является обеспечение требуемой шероховатости обработанной поверхности изделий.

3. Стабилизация режущих свойств шлифовального круга путем наложения электрических разрядов

Наряду с неравномерным износом при шлифовании фасонных поверхностей деталей профильными алмазными кругами при определенных условиях происходит «засаливание» рабочей поверхности инструмента [2]. Для поддержания режущей способности инструмента на постоянном уровне необходимо эффективно удалять продукты шлифования с поверхности круга (рис. 2). Это можно достигнуть воздействием электрических разрядов, вследствие которых происходит стабилизация режущих свойств круга за счет дополнительного «обнажения» алмазных зерен и удаления шлама с рабочей поверхности инструмента [3].

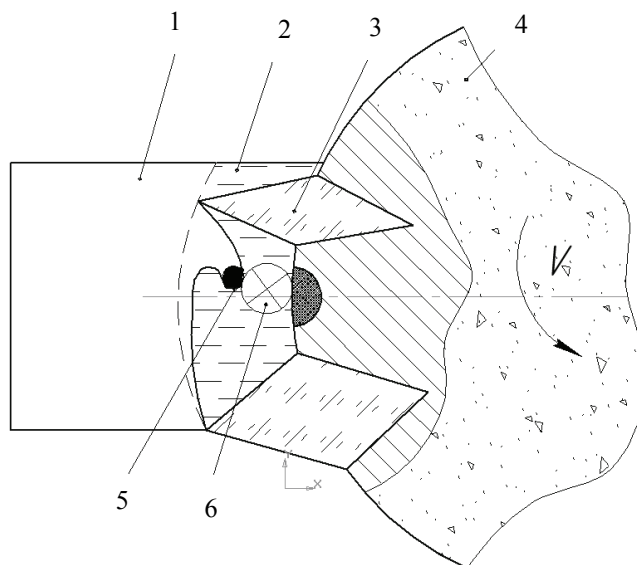


Рис. 2. Схема процесса электроэрозионной правки шлифовального круга:

- 1 – электрод; 2 – жидкостная среда; 3 – алмазное зерно;
4 – алмазоносный слой круга; 5 – стружка; 6 – микродуговой разряд

Высокие режущие свойства алмазного круга, обеспечиваемые при электроэрозионном воздействии, позволяют проводить эффективное шлифование труднообрабатываемых материалов при меньших значениях зернистости круга, чем это рекомендуется при профильном алмазном шлифовании [4], что позволит дополнительно уменьшить шероховатость обработанной поверхности деталей.

Наиболее рациональные условия электроэрозионного шлифования, обеспечивающие непрерывное вскрытие зерен в процессе обработки и стабилизацию режущих свойств алмазного круга, достигаются при условии, что электрические режимы процесса согласованы с конструктивными параметрами круга, характеристикой алмазосодержащего слоя и длиной l_3 электрода-инструмента.

В предложенной схеме электроэрозионного шлифования (рис. 3) напряжение U , создаваемое источником постоянного тока 1, подается на круг 2 и электрод-инструмент 3.

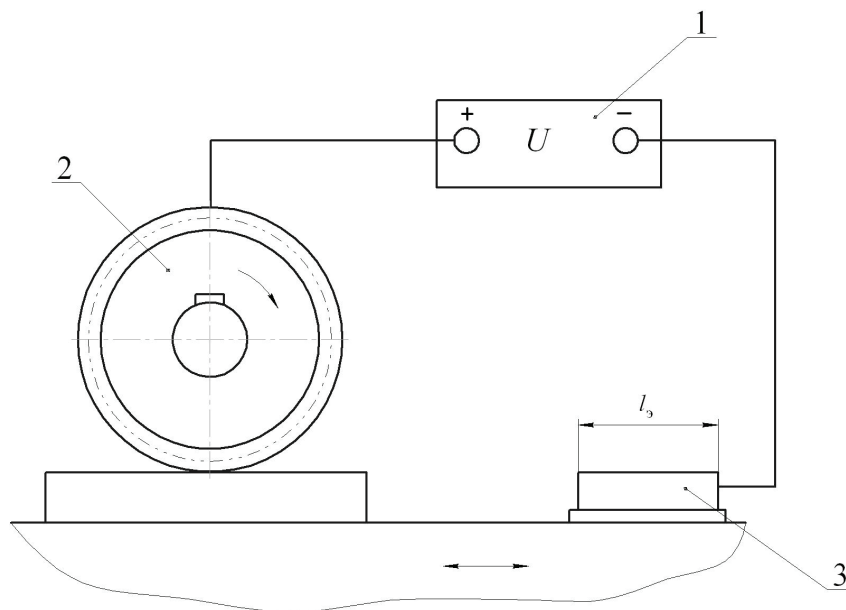


Рис. 3. Схема алмазного шлифования с электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга

Для уменьшения воздействия электрических разрядов на материал связки шлифовального круга величину напряжения U в вольтах следует ограничивать по следующему выражению [5]:

$$U = k_c \frac{\pi D_{\text{кр}} \Delta}{l_3 N \eta \beta} \left(1 - \frac{K}{400} \right),$$

где k_c – коэффициент, зависящий от типа связки; $D_{\text{кр}}$ – наружный диаметр шлифовального круга; Δ – толщина алмазоносного слоя, удаляемого с поверхности круга при однократном воздействии, за один двойной ход стола, $\Delta = (4 \dots 7) \% Z_{\text{max}}$ (Z_{max} – максимальный размер алмазных зерен); l_3 – длина правящего электрода-инструмента; N – количество алмазных зерен, приходящееся на единицу длины электрода.

дящихся на 1 мм^2 рабочей поверхности круга; η – коэффициент, определяющий количество зерен, участвующих в резании; β – коэффициент, учитывающий вероятность возникновения электрических разрядов при стружечном замыкании, $\beta = 0,85 \dots 0,95$; K – концентрация алмазных зерен в алмазоносном слое круга, %.

Профильное врезное шлифование плоских образцов из твердого сплава ВК6 осуществлялось на плоскошлифовальном станке 3Е71В алмазным кругом 1А1 250×20×76×5 АС6 100/80 100 М1. Электроэрозионная правка круга производилась после каждого двойного хода детали со столом станка электродом-инструментом из латуни ЛС59 длиной $l_3 = 60 \text{ мм}$ с использованием источника постоянного тока. Коэффициенты и параметры для расчета напряжения U по эмпирической формуле определялись следующим образом. Значение коэффициента k_c , влияющего на величину электрического импульса при эрозионном разрушении металлической связки М1 круга, выбиралось по табл. 2. Для используемого нами алмазного круга $k_c = 1$. Наружный диаметр круга в соответствии с маркировкой составил $D_{\text{кр}} = 250 \text{ мм}$. Толщина Δ алмазоносного слоя, удаляемого с поверхности инструмента за один двойной ход стола, для круга зернистостью 100/80 составила 6 мкм.

Таблица 2

Значения коэффициента k_c для различных металлических связок алмазных кругов

Марка связки	М1	МЖ	МС1, МС3, МС6	МО4	МО16	Ж1
Значения k_c	1	1,22	1,23	1,39	1,43	2,38

Количество N алмазных зерен, приходящихся на 1 мм^2 рабочей поверхности круга (сечения алмазоносного слоя), для марки АС6 и зернистости 100/80 составило $N = 57,8$ шт. (табл. 3). Длина l_3 правящего электрода принята $l_3 = 60 \text{ мм}$ (для плоскошлифовальных станков $l_3 = 50 \dots 100 \text{ мм}$). Значения безразмерных коэффициентов η и β приняты равными $\eta = 0,12$; $\beta = 0,85$.

Таблица 3

Среднее число N зерен, приходящихся на 1 см^2 сечения алмазоносного слоя, при 100 % концентрации, шт.

Зернистость порошка	Марка алмаза				
	АСД (АС2)	АСР (АС4)	АСВ (АС6)	АСК (АС15)	АСС
630/500	–	–	–	–	203
500/400	–	–	–	312	304
400/315	–	–	486	473	461
315/250	–	–	734	715	697
250/200	–	1210	1110	1080	1060
200/160	–	1820	1680	1600	1600
160/125	2920	2730	2540	2490	2420
125/100	4350	4100	3840	3760	3670
100/80	6460	6160	5780	5710	5550
80/63	9580	9240	8750	8650	8400
63/50	14200	13900	13200	13100	12700
50/40	21200	20900	20000	19900	19200

Концентрация K алмазных зерен в алмазоносном слое в соответствии с маркировкой составила $K=100\%$.

Режимы шлифования: скорость круга $v_k = 30$ м/с; подача на глубину шлифования $t_m = 0,005$ мм/ход; скорость возвратно-поступательного движения стола $S_{пр} = 6$ м/мин. Время электроэрозионного воздействия на поверхность круга за один двойной ход детали со столом станка составило $t = 0,9$ с.

В табл. 4 приведены рекомендуемые значения напряжения для алмазного шлифования кругами разной зернистости на металлической связке М1.

Таблица 4

Рекомендуемые значения напряжения (B)
при алмазном электроэрозионном шлифровании

Зернистость алмазов	Концентрация алмазов в круге		
	50 %	100 %	200 %
63/50	7	6	4
100/80	12	10	7
160/125	19	16	11
250/200	29	25	17

В качестве смазочно-охлаждающих жидкостей при алмазном шлифовании с наложением электрических разрядов рекомендуется использовать жидкости на водной основе, а также смесь раствора кальцинированной соды концентрацией 1...3 % с техническим глицерином. Последние применяются для улучшения отвода тепла из зоны резания и достижения меньшей шероховатости обработанной поверхности ($R_a = 0,3 \dots 0,5$ мкм).

Заключение

Предложенный новый способ получения профильных алмазных шлифовальных кругов на металлических связках позволяет существенно снизить износ круга и сделать его более равномерным по профилю. Таким образом, предложенная технология получения профильных кругов за две технологические операции имеет большие потенциальные возможности для повышения размерной стойкости, а следовательно, и точности профильного врезного шлифования инструментами на металлических связках.

При этом достигается дополнительное снижение шероховатости получаемой поверхности за счет частичного устранения разновысотности зерен и выравнивания режущего контура. Установлено, что шероховатость поверхности, обработанной кругом, окончательно спрофилированным накатыванием, практически не отличается от шероховатости, полученной приработанным кругом. Поэтому применение накатанных кругов после электроэрозионного профилирования позволяет избежать приработки.

Разработанный способ электроэрозионного шлифования накатанными алмазными кругами позволяет стабилизировать шероховатость поверхности и избежать возникновения прижогов на твердосплавных и микротрещин на ферритовых деталях.

Список литературы

1. Пат. 2364497 Российская Федерация, МПК В24Д18/00. Способ изготовления профильных шлифовальных кругов / Соколов А. В. и др. ; заявитель и патентооб-

ладатель Пенз. гос. ун-т. – № 2008116945/02 ; заявл. 28.04.2008 ; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.

2. **Архипов, П. В.** О проблеме засаливания при электроалмазном шлифовании / П. В. Архипов, А. С. Янюшкин // Современные проблемы в технологии машиностроения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции: сборник трудов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – С. 42–45.
3. **Пахалин, Ю. А.** Алмазное контактно-эрозионное шлифование / Ю. А. Пахалин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с.
4. **Дорофеев, В. Д.** Профильное алмазное шлифование неметаллических материалов с электроэрозионной коррекцией круга – Электрофизико-химические и комбинированные методы обработки металлов / В. Д. Дорофеев, С. Ф. Кольчугин, Н. В. Фунтов : материалы конференции. – Пенза : Пенз. дом науч.-технич. пропаганды, 1984.
5. Пат. 2432239 Российская Федерация, МПК В23Н 5/04, В24В 53/00. Способ шлифования сложнопрофильных поверхностей деталей / Соколов В. О. и др.; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. ун-т. – № 2010105449/02 ; заявл. 15.02.2010 ; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30.

Зверовщиков Владимир Зиновьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии
машиностроения, Пензенский
государственный университет

E-mail: torp@pnzgu.ru

Zverovshikov Vladimir Zinovyevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of mechanical
engineering technologies,
Penza State University

Соколов Алексей Владимирович

аспирант, Пензенский
государственный университет

E-mail: Lexus-sokol@yandex.ru

Sokolov Aleksey Vladimirovich

Postgraduate student,
Penza State University

УДК 621.923

Зверовщиков, В. З.

Повышение качественных характеристик поверхности при профильном алмазном шлифовании / В. З. Зверовщиков, А. В. Соколов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 167–174.

УДК 621.717

И. И. Артемов, С. В. Кочкин, В. В. Кожевников

СНИЖЕНИЕ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ КОЛЕС ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СБОРКИ

Аннотация. Рассмотрен способ сборки стальных колес, учитывающий статическую неуравновешенность обода и диска, предложен числовой метод расчета динамической неуравновешенности ободьев и дисков с помощью трехмерного моделирования, предложена конструкция устройства для определения дисбаланса, а также приведены результаты экспериментального подтверждения эффективности предлагаемой сборки.

Ключевые слова: вектор дисбаланса, пространственно-ориентированная селективная сборка, стальное колесо, обод, диск, трехмерное твердотельное моделирование.

Abstract. The article describes a method of assembling steel wheels, which takes into account the static unbalance of a rim and a disk. The authors suggest a numerical method for calculating dynamic unbalance of rims and discs by means of three-dimensional modeling and a construction of the device to determine the unbalance vector. The article also introduces experimental results proving the effectiveness of the proposed assembly.

Key words: unbalance vector, dimension-oriented selective assembly, a rim, a disk, steel wheels, three-dimensional modeling.

Введение

Существующая технология производства стальных колес предполагает изготовление комплектующих деталей (обода и диска) методом холодной листовой штамповки и их последующей сборки, сварки, окраски. Операция сборки производится без учета дисбалансов деталей. Неуравновешенность колес может быть вызвана различными причинами, в частности конструкторско-технологическими дисбалансами, погрешностями изготовления, анизотропией физико-механических свойств и разнотолщиной листового проката. В результате в некоторых случаях величина главного вектора дисбаланса стального колеса превышает допустимое значение, установленное в конструкторской документации. Для стальных колес в зависимости от размера допустимая статическая неуравновешенность составляет 1500...2500 г·мм. Проведенные на производстве экспериментальные исследования показали, что около 0,5 % стальных колес имеют дисбаланс, превышающий допустимое значение. Для серийного производства с программой выпуска более 1 млн колес/год убытки, связанные с утилизацией такой продукции, являются значительными. Поэтому задача минимизации дисбаланса стальных колес именно на стадии их изготовления является актуальной.

1. Расчет динамической неуравновешенности ободьев и дисков стальных колес

Для расчета основных параметров динамической неуравновешенности стальных колес предлагается приближенный метод на основе трехмерного моделирования. Модель ротора разбивалась на части (элементарные роторы)

плоскостями, перпендикулярными оси вращения. Количество частей выбирается так, чтобы образованные элементарные роторы имели простую форму. Такое разделение позволило рассматривать каждую часть как отдельный ротор, обладающий только статической неуравновешенностью, выраженной в виде векторов $\overline{D}_{11}, \overline{D}_{12}, \overline{D}_{21}, \overline{D}_{22} \dots \overline{D}_{1n}, \overline{D}_{2n}$ (рис. 1). У векторов, расположенных слева от центра масс ($\overline{D}_{11}, \overline{D}_{12}$), первый индекс «1», у векторов справа – индекс «2». Главный вектор дисбаланса исследуемой детали определяется как векторная сумма проекций векторов $\overline{D}_{11}, \overline{D}_{12} \dots \overline{D}_{1n}, \overline{D}_{2n}$ на плоскость XOZ , перпендикулярную оси вращения и проходящую через центр масс детали:

$$\begin{aligned} \overline{D} = \sum_{i=1}^n (\overline{D}_{1i} + \overline{D}_{2i}) = & (\overline{D}_{11} \cdot \cos \alpha_{11} + \overline{D}_{12} \cdot \cos \alpha_{12} + \dots + \overline{D}_{1n} \cos \alpha_{1n}) + \\ & + (\overline{D}_{21} \cdot \cos \alpha_{21} + \overline{D}_{22} \cdot \cos \alpha_{22} + \dots + \overline{D}_{2n} \cos \alpha_{2n}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{1n}$ – угол между проекцией соответствующего вектора на плоскость XOZ и осью OX .

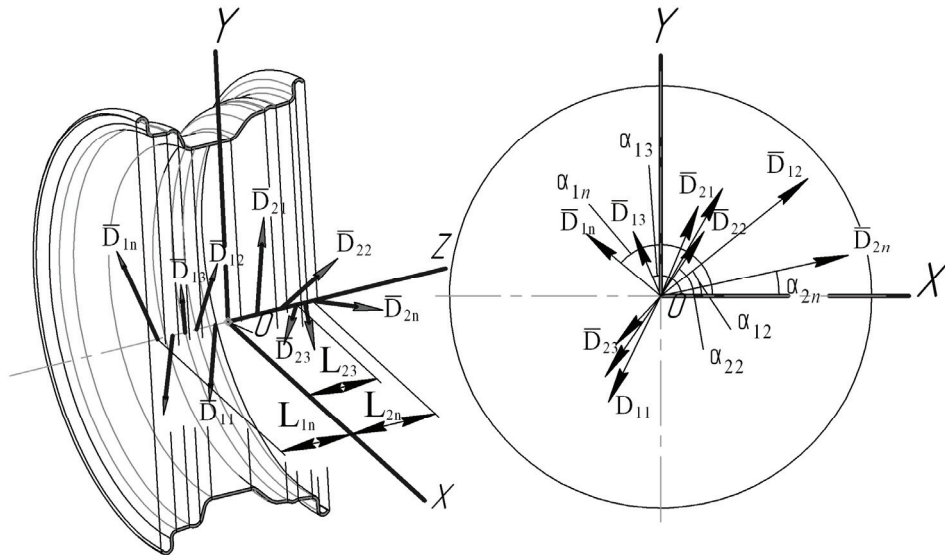


Рис. 1. Схема для расчета динамического дисбаланса сложного ротора

Главный момент дисбаланса расположен в плоскости XOZ и определяется как сумма произведений главного вектора каждого элементарного участка на расстояние между центрами масс элементарного участка и исследуемой детали:

$$\overline{M}_D = \sum_{i=1}^n (\overline{D}_{1i} L_{1i} - \overline{D}_{2i} L_{2i}). \quad (2)$$

При этом необходимо учитывать взаимное положение и направление векторов.

Методика была ранее апробирована авторами при расчете конструктивных дисбалансов коленчатых валов тепловозных дизелей средней мощности и дала хорошие результаты. В данном случае она позволила определить значения параметров неуравновешенности, которые могут получиться в результате наличия дефектов в материале или погрешностей изготовления. Основные предельные значения параметров отклонений стального колеса размером 14 дюймов, полученные экспериментально на Тольяттинском заводе стальных колес (ТЗСК), и результаты расчета главного вектора и главного момента дисбаланса диска, обода и колеса представлены в табл. 1.

В столбцах 5, 6 и 9, 10 табл. 1 представлена динамическая неуравновешенность, выраженная в виде двух уравнивающих грузов, расположенных на бортовых краях обода (в плоскостях приведения). При моделировании различных отклонений обода стального колеса рассматривались два предельных варианта, при которых расположение несбалансированной массы приводило к появлению максимально возможных главного вектора или главного момента дисбалансов.

Минимизация влияния вышеназванных причин появления дисбаланса за счет применения более точного и более дорогого оборудования или предъявления более жестких требований к штампам приведет к удорожанию себестоимости производства колес. Наиболее целесообразным является применение специального способа сборки, при котором дисбалансы обода и диска компенсируют друг друга.

2. Устройство для определения статической неуравновешенности ободьев и дисков стальных колес

Традиционный процесс балансировки включает в себя разгон детали до рабочей частоты вращения, измерение величины неуравновешенности и торможение детали. Это занимает продолжительное время, что в условиях серийного производства колес не представляется возможным. Поэтому в рамках настоящего исследования решено использовать метод определения дисбаланса в режиме малых угловых колебаний [1], который обеспечивает требуемую производительность и достаточную точность.

Предлагаемое устройство для определения статической неуравновешенности представлено на рис. 2. Режим работы устройства – дорезонансный, т.е. частота угловых колебаний привода меньше собственной частоты колебательной системы. Электродвигатель 1 приводит вал 2, упругий элемент 3, а вместе с ними и балансируемую деталь 4 в колебательное движение относительно вертикальной оси с амплитудой 5° и частотой 10 Гц [2]. При наличии дисбаланса балансируемая деталь совершает вынужденные изгибные колебания относительно горизонтальной оси, проходящей через точку О (точку качания системы). Амплитуда этих колебаний измеряется с помощью двух установленных ортогонально лазерных триангуляционных датчиков 6 и определяет величину дисбаланса.

3. Расчет упругого элемента устройства для определения неуравновешенности обода и диска

Основным элементом колебательной системы любого устройства измерения параметров дисбаланса в динамическом режиме, определяющим режим работы и качество измерений, является упругий элемент, который в данном случае представляет собой кольцевую выточку на цилиндрическом валу (рис. 3).

Таблица 1
Результаты расчетов основных параметров динамической неуравновешенности диска, обода и стального колеса

Причина появления дисбаланса	Предельные значения параметра (отклонение)	Значение дисбаланса								
		Максимальная статическая составляющая дисбаланса				Максимальная моментная составляющая дисбаланса				
		D , г·мм	M_D , г·мм ²	m_1 , г	m_2 , г	D , г·мм	M_D , г·мм ²	m_1 , г	m_2 , г	
Ободья стальных колес										
	Неравномерная толщина листового проката	±0,1 мм	9448	16000	28	24,5	365	438498	18,7	16,1
	Утоньшение стенок ободьев на радиусах скругления, вызванное анизотропией механических свойств	до 1,9 мм при толщине листового проката 2,5 мм	136	1976	0,16	0,15	0	3623	0,14	0,14
	Торцевое биение обода	0,8 мм	2360	25960	7,6	5,5	20,2	53723	2,1	2,1
	Суммарное воздействие всех вышеперечисленных факторов		11944	43936	34,2	30,8	385,2	495844	20,7	18,7
Диски стальных колес										
	Неравномерная толщина листового проката	±0,22 мм	8016	3967	19	28	–	–	–	–
	Неодинаковая толщина юбки диска, вызванная смещением пуансона относительно матрицы	до 1 мм	2332	2964	5	17	–	–	–	–
	Утоньшение стенок дисков на радиусах скругления	до 2,8 мм при толщине листового проката 3,2 мм	280	463	0,6	2	–	–	–	–
	Наличие радиального биения юбки диска	до 0,2 мм	421	4875	1	3	–	–	–	–
	Отклонение размера вентиляционных окон в пределах допуска	±0,1мм	848	1127	2	6	–	–	–	–
	Непараллельность юбки	0,5	336	1857	1	2,	–	–	–	–
	Суммарное воздействие всех вышеперечисленных факторов		12233	37122	28,6	24,5	–	–	–	–
	Стальное колесо									
	Суммарное воздействие всех вышеперечисленных факторов		24177	87568	54,3	38,9	12618,2	502842	58	42,8

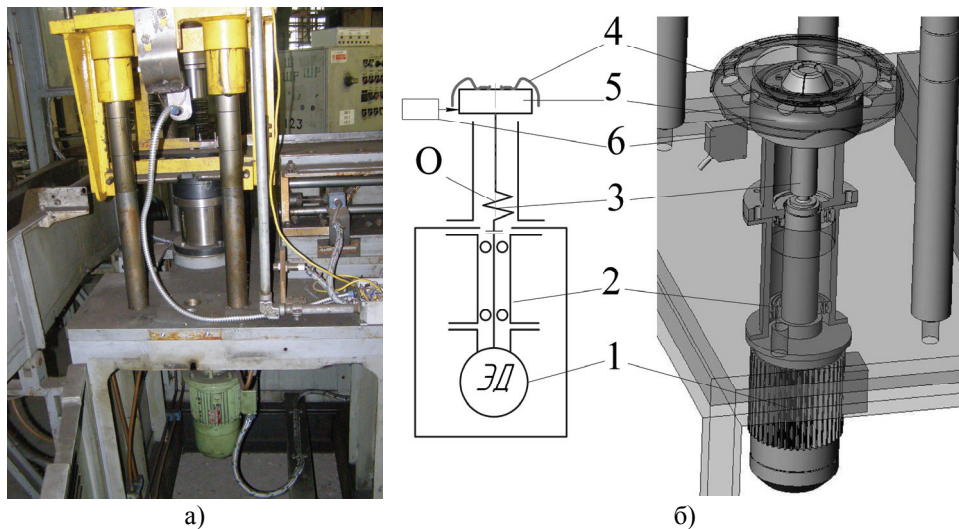


Рис. 2. Устройство для определения неуравновешенности у ободьев и дисков стальных колес, работающее в режиме малых угловых колебаний

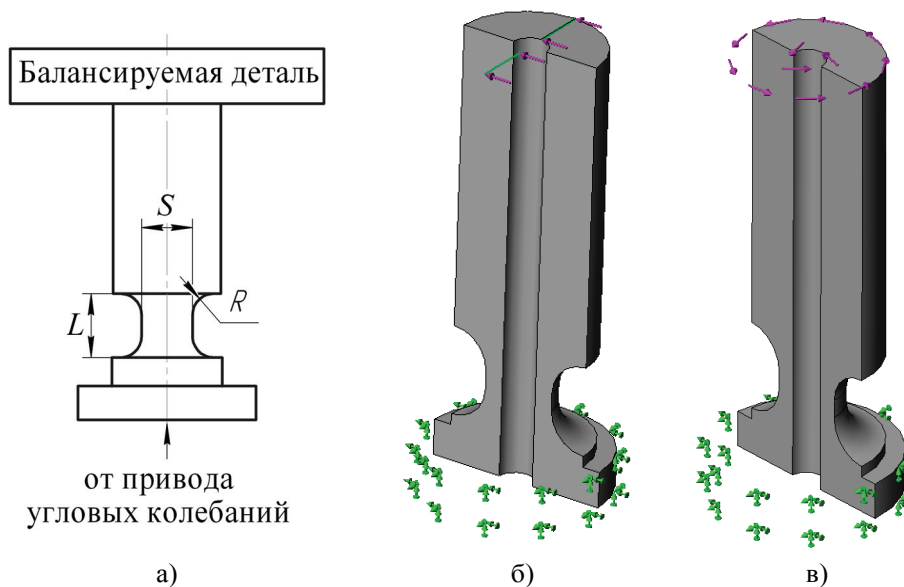


Рис. 3. Упругий элемент: а – общий вид; б – схема нагружения при изгибе; в – схема нагружения при кручении

Упругий элемент должен иметь определенную жесткость на кручение и изгиб. На кручение требуется максимальная жесткость для минимизации отклика колебательной системы на действие тангенциальных сил инерции. Жесткость на изгиб должна иметь строго определенное значение. Она была выбрана исходя из экваториального момента инерции системы: балансируемая деталь – зажимной механизм (для обода $I_p = 0,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; для диска $I_p = 0,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) с учетом соблюдения условия дорезонансного режима работы балансировочного устройства, при котором отношение частот собственных и вынужденных колебаний $f_0/f = 3 \dots 4$. Частота рабочих угловых колебаний устройства f была принята равной 10 Гц. В этом случае собствен-

ная частота упругого элемента с присоединенной нагрузкой должна составлять не менее 30...40 Гц. Принятый режим работы позволяет избежать применения сложных демпфирующих устройств. При разработке конструкции упругого элемента проводилось моделирование, которое заключалось в создании трехмерной твердотельной модели в программе Solid Works, приложении к ней статических нагрузок (ограничений) и последующем расчете деформаций с помощью программы COSMOS Works.

Критерием оценки выбора упругого элемента служило максимальное значение коэффициента устойчивости ξ , равного отношению собственных частот крутильных и изгибных колебаний упругого элемента [3].

В результате расчета построено семейство графиков, показанных на рис. 4, который иллюстрирует зависимость коэффициента устойчивости ξ от протяженности и диаметра перемычки для колебательной системы с ободом. Как видно из графика, наибольшие значения коэффициента ξ наблюдаются при $L = 16$ мм. Дальнейшее увеличение протяженности перемычки нецелесообразно вследствие приближения к пределу прочности значений напряжений в упругом элементе при максимальной нагрузке.

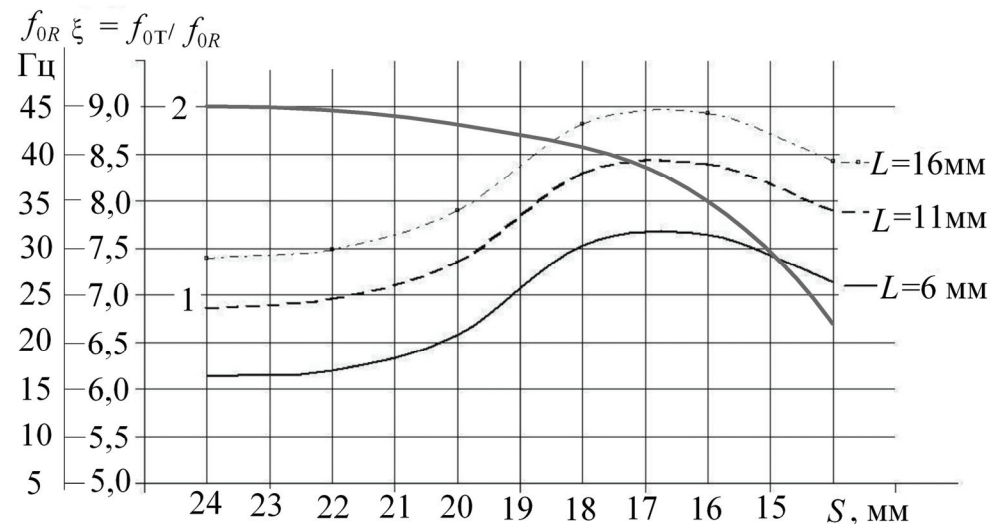


Рис. 4. Результаты расчета упругого элемента колебательной системы балансировочного устройства для ободьев стальных колес:
1 – семейство зависимостей $\xi = f(S)$ при различных L ; 2 – $f_{0R} = f(S)$

Представленный на рис. 4 график позволил выбрать основные геометрические параметры упругого элемента колебательной системы устройства для балансировки ободьев, которые составили $S = 18$ мм, $L = 16$ мм (при $f_{0T} = 40$ Гц). Основные геометрические параметры упругого элемента колебательной системы для балансировки дисков определялись аналогично и составили $S = 16$ мм, $L = 16$ мм (при $f_{0T} = 36$ Гц).

4. Технологический процесс пространственно-ориентированной селективной сборки стальных колес

Предлагаемый технологический процесс ориентированной селективной сборки стальных колес состоит из следующих основных этапов:

1. Укладка ободьев или дисков на стол подачи заготовок.
2. Подача одной детали в механизм определения дисбаланса. Зажим детали.
3. Определение величины и места расположения статического дисбаланса у детали.
4. Сортировка деталей на группы по значению дисбаланса. Детали первой группы автоматически помещаются в накопитель. Детали второй группы – на станцию маркировки.

Для определения границ групп сортировки необходимо исследование фактических законов распределения значений дисбалансов ободьев и дисков. Объем выборочной совокупности рассчитывался по следующей формуле [5] и составил 240 шт.:

$$n = \frac{Nt^2\sigma^2}{N\Delta_{\bar{X}}^2 + t^2\sigma^2}, \quad (3)$$

где $N = 1,4$ млн шт./год – годовая программа выпуска; $t = 0,945$ – коэффициент доверия; $\sigma = 199$ г · мм – среднее квадратическое отклонение дисбаланса в выборке; $\Delta_{\bar{X}} = 12$ г · мм – предельная ошибка выборочной средней.

Отбор деталей в выборки осуществлялся в начале каждого месяца по 20 шт. в течение года. Исследование дисбаланса ободьев и дисков, принадлежащих таким выборкам, позволило учесть практически все возможные причины появления. На каждой детали было отмечено положение неуравновешенности. По результатам полученных экспериментальных данных построены гистограммы и кривые распределения статической неуравновешенности ободьев (рис. 5,а) и дисков (рис. 5,б), которые подчиняются нормальному закону распределения, что было доказано по критерию Пирсона (χ^2).

Известно, что большое число групп сортировки осложняет процесс сборки. На ТЗСК сборка ободьев с дисками осуществляется на двух параллельно работающих линиях. В связи с этим наиболее рациональным для данного предприятия является разделение ободьев и дисков на две группы. Это исключает необходимость введения в технологическую линию дополнительного места сборки (или необходимость при существующем количестве сборочных участков обеспечения сложной организации производства).

Границы значений дисбалансов групп сортировки были выбраны исходя из следующих соображений. Во-первых, в первую группу помещают детали, которые при сборке при любом взаимном положении (даже в случае однонаправленности главных векторов дисбалансов обода и диска) не приведут к появлению дисбаланса, превышающего максимально допустимое значение ($X_{об} + X_{д} < 1500$).

После сортировки ободья и диски, принадлежащие первой группе, собираются без учета расположения их статической неуравновешенности, что значительно упрощает процесс сборки колес, так как в данном случае маркировка не требуется, а селективная сборка заключается в отбраковке деталей, дисбаланс которых превышает определенное значение. Во-вторых, при выборе границы групп сортировки необходимо учесть возможность образования незавершенного производства (появления деталей, для которых нет пары). Для выполнения этих условий была решена система уравнений:

$$\begin{cases} \int_0^{u_{об}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \int_0^{u_{д}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \\ X_{об} + X_{д} < 1500, \end{cases}$$

где

$$u_{об} = \frac{X_{об} - \overline{X_{об}}}{\sigma_{об}}; \quad u_{д} = \frac{X_{д} - \overline{X_{д}}}{\sigma_{д}};$$

$$s = \int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt -$$

площадь области, ограниченной кривой распределения и вертикальной линией, соответствующей границе группы сортировки.

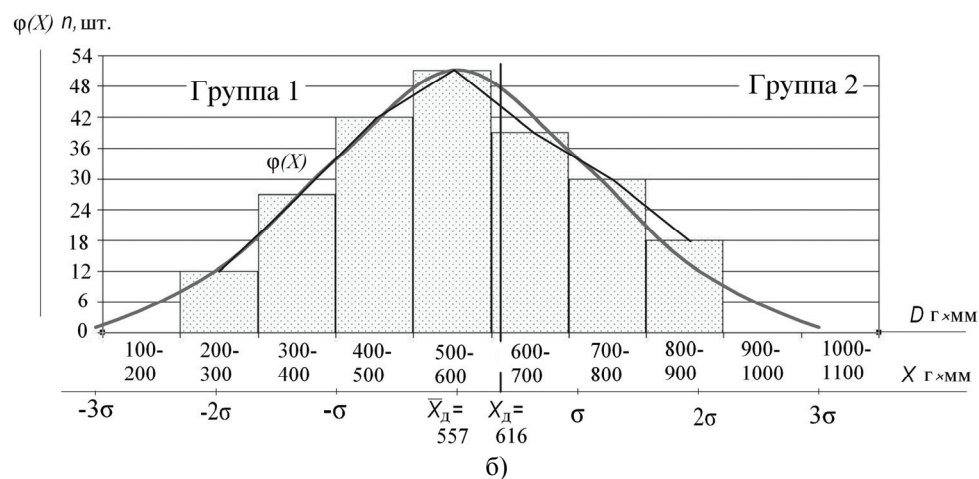
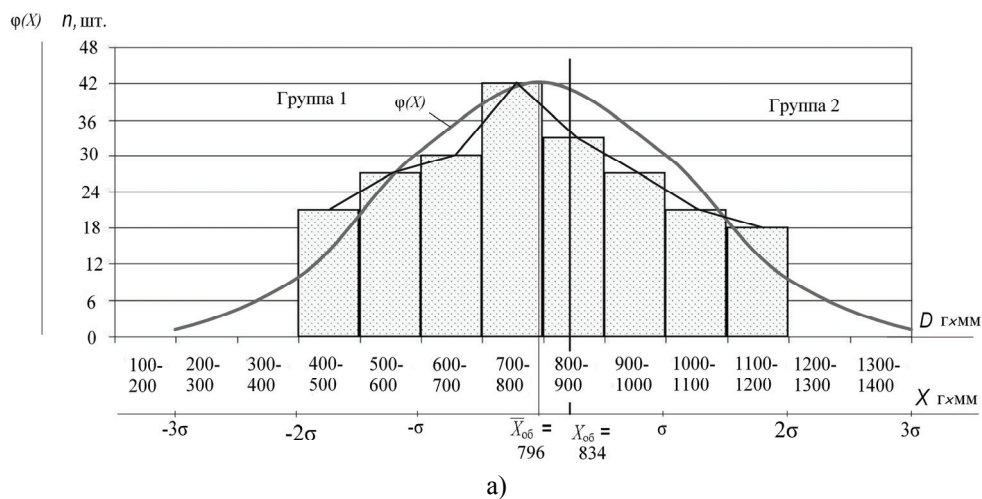


Рис. 5. Распределение статической неуравновешенности ободьев (а) и дисков (б) стальных колес диаметром 14 дюймов

В результате были определены границы интервалов первой группы сортировки, которые составили для ободьев стальных колес диаметром 14 дюймов $834 \text{ г} \cdot \text{мм}$; для дисков $616 \text{ г} \cdot \text{мм}$. В этом случае к первой группе относится более 67 % объема генеральной совокупности деталей.

5. Маркировка направления главного вектора дисбаланса. Для обода стального колеса маркируется положение «тяжелого места»; для диска – положение «легкого места».

6. Перемещение деталей с маркировкой в накопитель второй группы. Перемещение накопителя на станцию запрессовки.

7. Укладка диска в обод стального колеса соответствующих групп сортировки. Причем при сборке деталей второй группы необходимо совместить метки обода и диска. Запрессовка диска в обод. Перемещение колеса в сварочную машину.

8. Автоматическая сварка колеса.

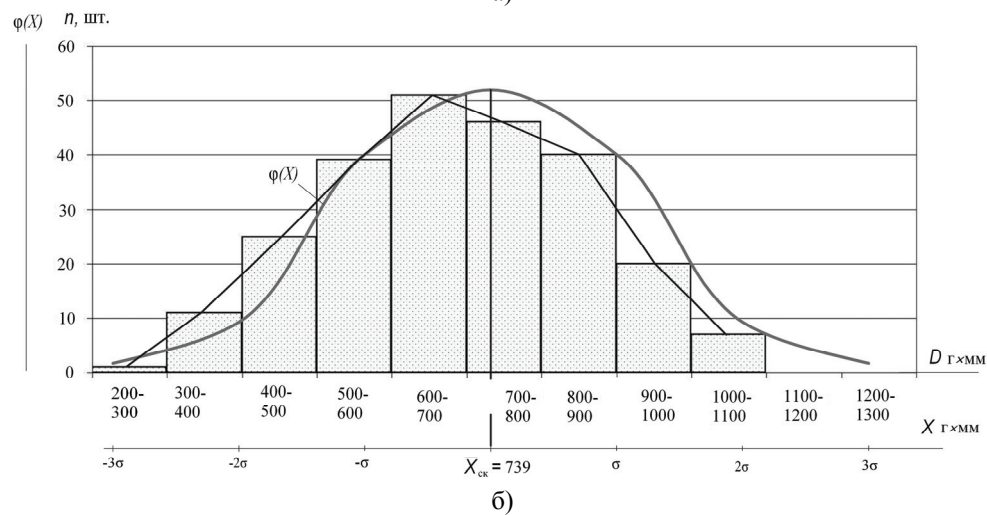
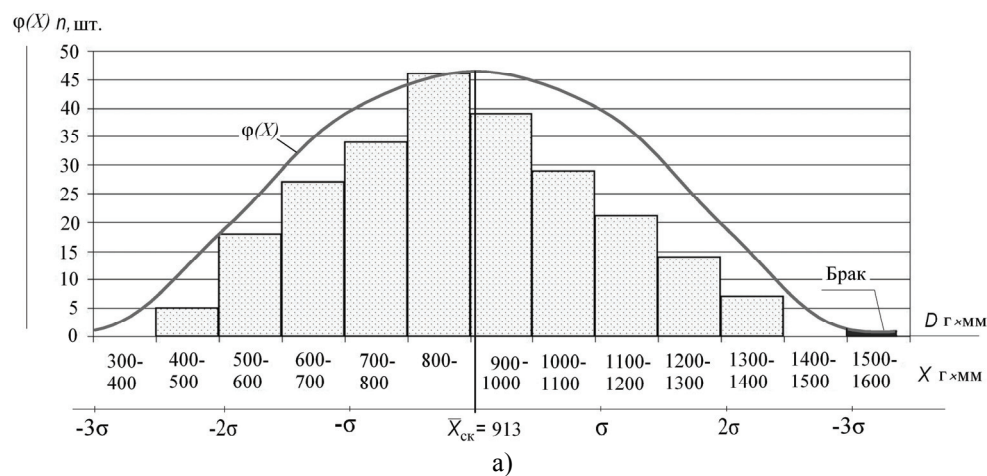


Рис. 6. Гистограммы распределения величины статической неуравновешенности стальных колес без применения ориентированной селективной сборки (а) и после внедрения (б)

Для экспериментального подтверждения основных положений настоящей работы было проведено измерение величины статической неуравновешенности двух выборок стальных колес по 240 шт. в каждой. В первую выборку вошли стальные колеса диаметром 14 дюймов, собранные с помощью традиционной технологии сборки, т.е. без учета статических неуравновешенностей ободьев и дисков (отбор деталей в выборки осуществлялся аналогично выборке ободьев или дисков). Стальные колеса второй группы были изготовлены из отобранных ободьев и дисков с помощью предлагаемой пространственно-ориентированной селективной сборки.

В результате были построены кривые нормального распределения статических неуравновешенностей стальных колес без применения ориентированной селективной сборки (рис. 6,а) и после ее внедрения (рис. 6,б). Анализ кривой распределения показал, что около 0,5 % стальных колес в первом случае имеют дисбаланс, превышающий допустимое значение, что является браком. Внедрение ориентированной селективной сборки позволило уменьшить общую неуравновешенность стальных колес (центр группирования $\bar{X}_{ск}$ уменьшился на 173 г · мм: с 912 до 739 г · мм, а среднеквадратическое отклонение σ уменьшилось на 33 г · мм), что практически исключает появление брака.

Заключение

Предложенный технологический процесс пространственно-ориентированной селективной сборки стальных колес с учетом величины и места расположения дисбалансов обода и диска позволил свести к минимуму вероятность появления брака, связанного с превышением допустимого значения статической неуравновешенности. Положительный эффект описанной сборки был подтвержден экспериментально на Тольяттинском заводе стальных колес.

Список литературы

1. Пат. 2382999 Российская Федерация, МПК⁷ G01M 1/16. Способ динамической балансировки ротора / Трилисский В. О., Кочкин С. В., Кожевников В. В. ; патентообладатель Пенз. гос. ун-т. – № 2008138835/28 ; заявл. 30.09.2008 ; опубл. 27.02.2010, Бюл. № 6. – 3 с.
2. **Кочкин, С. В.** Способ измерения динамического дисбаланса жестких роторов в режиме малых угловых колебаний / С. В. Кочкин, В. В. Кожевников // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008. – № 3. – С. 202–205.
3. **Кочкин, С. В.** Упругие элементы колебательных систем балансировочных устройств, работающих в вибрационном режиме / С. В. Кочкин, Б. А. Малев, В. В. Кожевников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 9–18.
4. ГОСТ 22061–76 Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Методические указания. – М. : Госстандарт, 1984. – 112 с.
5. **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 11-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2005. – 479 с.

Артемов Игорь Иосифович

доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе,
Пензенский государственный
университет

E-mail: rectorat@pnzgu.ru

Artyomov Igor Iosifovich

Doctor of engineering sciences,
professor, vice-rector for research,
Penza State University

Кочкин Сергей Вячеславович

кандидат технических наук, начальник
инновационно-аналитического отдела,
Пензенский государственный
университет

E-mail: ksvp@rambler.ru

Kochkin Sergey Vyacheslavovich

Candidate of engineering sciences,
head of innovation-analitical department,
Penza State University

Кожевников Вячеслав Владимирович

ассистент, кафедра
металлообрабатывающие станки
и комплексы, Пензенский
государственный университет

E-mail: redans@yandex.ru

Kozhevnikov Vyacheslav Vladimirovich

Assistant, sub-department of metal-working
machines and complexes, Penza
State University

УДК 621.717

Артемов, И. И.

Снижение неуравновешенности стальных колес путем применения пространственно-ориентированной сборки / И. И. Артемов, С. В. Кочкин, В. В. Кожевников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 175–185.

Вниманию 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.