

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Новый подход к защите данных в информационной системе ... 157
- Парамонов И. Ю., Смагин В. А., Харин В. Н. Оценивание эффективности функционирования информационной системы в условиях техногенного риска 167
- Фуртат И. Б., Тупичин Е. А. Упрощенный алгоритм бэкстеппинга для управления нелинейными системами 173
- Григорьев А. Н., Дудин Е. А. Метод адаптивного сжатия спутниковых изображений земной поверхности 179
- Багрецов С. А., Мищенко Э. В. Модель управления производственной системой на основе аппарата обобщенных матричных чисел 185

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Голяков А. Д., Фоминов И. В. Аналитический метод оценивания точности адаптивной системы автономной навигации космического аппарата 190
- Быковский С. В. Метод встроенной динамической актуализации функциональных моделей систем на кристалле 197
- Ожиганов А. А. Нереверсивный цифровой преобразователь угла на основе двухдорожечной рекурсивной кодовой шкалы 203

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Мальцева Н. К. Методика оценивания коэффициента ослабления двухступенчатого фотометрического ослабителя 207
- Смирнов Р. И., Бутурлимов О. В., Казунин Д. В. Метод расчета распределения параметров газожидкостной смеси по глубине добывающей скважины 214
- Кривошейкин А. В., Перельгин С. В. Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны 221
- Дидык П. И., Семёнов В. Л., Басовский А. А., Жуков А. А. Установка для термоциклирования в диапазоне температур 83—473 К 226
- Елисеев В. В., Бахрами М. Р. Динамика проводов ЛЭП при движении по ним диагностической машины 229
- Марцуков А. А., Бахрами М. Р. Динамика проводов ЛЭП при движении по ним диагностической машины 236

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Зеленцов В. А., Крыленко И. Н., Пиманов И. Ю., Потрясаев С. А., Соколов Б. В., Ахтман Й. Основы построения системы обработки данных дистанционного зондирования Земли на базе сервис-ориентированной архитектуры 241

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Shcheglov K. A., Shcheglov A. Yu. New Approach to Data Securing in Information System	157
Paramonov I. Yu., Smagin V. A., Kharin V. N. Assessing the Operation Efficiency of Information System under Technogenic Risk Conditions.....	167
Furtat I. B., Tupichin E. A. Simplified Backstepping Algorithm for Control of Nonlinear Systems	173
Grigoriev A. N., Dudin E. A. Method for Adaptive Compression of Satellite Images of Earth Surface	179
Bagrecov S. A., Mishchenko E. V. Theoretical Model of Control over Production System on the Base of the Generalized Matrix Value Concept.....	185

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

Golyakov A. D., Fominov I. V. Analytical Method for Estimating the Accuracy of Adaptive System of Spacecraft Autonomous Navigation.....	190
Bikovskiy S. V. Method of Embedded Dynamic Actualization of Functional Model of System on a Chip.....	197
Ozhiganov A. A. Non-Reversible Digital Angle Converter on the Basis of the Dual-Track Recursive Code Scale.....	203

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Maltseva N. K. Method for Estimating Optical Flux Attenuation by Two-Stage Optical Attenuator	207
Smirnov R. I., Buturlimov O. V., Kazunin D. V. Method of Calculating of Gas-Liquid Mixture Parameters Distribution in Exploitation Well Depth	214
Krivosheikin A. V., Perelygin S. V. Microphone Array for Directional Acoustic Antenna Implementation	221
Didyk P. I., Semyonov V. L., Basovsky A. A., Zhukov A. A. Thermocycling Setup for Temperature Range of 83—473 K.....	226
Eliseev V. V., Bahrami M. R. Dynamic of Electrical Transmission Wires at a Diagnostic Machine Movement along the Line	229
Martsukov A. A., Mamedov R. K. Metrological Study of Atomic Emission Spectrometers Based on CCD Lines	236

BRIEF NOTES

Zelentsov V. A., Krylenko I. N., Pimanov I. Yu., Potryasaev S. A., Sokolov B. V., Akhtman Yo. Principles of Earth Remote Sensing Data Processing System Design on the Base of Service Oriented Architecture	241
--	-----

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

НОВЫЙ ПОДХОД К ЗАЩИТЕ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

К. А. ЩЕГЛОВ, А. Ю. ЩЕГЛОВ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: info@npp-itb.spb.ru

Рассмотрен новый подход к защите обрабатываемых в информационной системе данных, основанный на реализации методов контроля и разграничения прав доступа к создаваемым объектам — файловым объектам и буферу обмена, что позволяет исключить объект доступа из разграничительной политики за счет автоматической разметки создаваемых объектов. Практическая реализация предложенного подхода проиллюстрирована на примере запатентованного и апробированного технического решения. Показано, что поскольку использование предложенного подхода принципиально меняет требования к реализации других механизмов защиты, решающих совсем иные задачи, чем контроль и разграничение прав доступа, совокупность полученных решений образует новую технологию защиты данных, обрабатываемых в информационной системе.

Ключевые слова: информационная система, защита данных, несанкционированный доступ, контроль и разграничение прав доступа, разграничительная политика, создаваемый объект.

Введение. Решение задачи защиты информации от несанкционированного доступа в любой информационной системе основано на контроле и разграничении прав доступа (далее — контроль доступа) субъектов к объектам — защищаемым ресурсам. Целью контроля доступа является ограничение производимых в системе действий, которые потенциально могут нанести вред. На практике используется одна из абстрактных моделей дискреционного, мандатного и ролевого контроля доступа [1, 2].

Дискреционный (называемый также избирательным) контроль доступа (Discretionary Access Control — DAC) основан на реализации модели Харрисона — Руззо — Ульмана [3]. В основе построения разграничительной политики доступа лежит задание администратором матрицы доступа — списка правил доступа к объектам субъектов. Дискреционный метод контроля доступа предусматривает для пользователей либо произвольный, либо принудительный способ управления потоками информации [4]. При произвольном управлении предполагается, что владелец объекта (пользователь, создавший объект) может задавать правила доступа к нему — назначать, кто имеет доступ к объекту и вид доступа. Этот метод широко используется в современных универсальных операционных системах (ОС). Альтернативным решением является исключение сущности владения из схемы управления с возложением всех задач настройки разграничительной политики доступа на выделенного субъекта — администратора.

Мандатный контроль доступа (Mandatory Access Control — MAC) основан на абстрактной модели Белла — ЛаПадулы [5]. Каждому субъекту и объекту системы назначается некоторый уровень безопасности — присваивается метка безопасности. Контроль доступа состоит

в арифметическом сравнении меток субъекта и объекта при анализе запроса доступа. Субъекту предоставляется доступ к объекту, если выполняется заданное отношение — формализованное правило, предполагающее арифметическое сравнение меток, соответствующих уровням безопасности объекта и запросившего к нему доступ субъекта. Эта модель имеет ряд ограничений по практическому использованию. Во-первых, разграничительная политика доступа реализуется не между отдельными субъектами-пользователями, а между группами субъектов, характеризуемых одним уровнем безопасности (в общем случае требуется еще и разграничивать права доступа к объектам между субъектами, отнесенными к одному уровню безопасности); во-вторых, подобной классификацией сложно воспользоваться для системных субъектов и объектов, прежде всего исполняемых. Поэтому в критичных приложениях требуется применять одновременно дискреционный и мандатный методы, что и регламентируется действующим сегодня нормативным документом в области информационной безопасности [6]. Этим же документом регламентируется применение в критичных приложениях принудительного управления потоками информации, что крайне важно, поскольку санкционированный пользователь должен рассматриваться в современных условиях как потенциально возможный нарушитель безопасности [4].

В последнее время активно развивается ролевая модель контроля доступа (Role-Based Access Control — RBAC) [1], основанная на максимальном приближении логики работы системы к реальному разделению функций персонала в организации. Применение данного метода подразумевает определение ролей в системе как совокупность действий и обязанностей, связанных с видом деятельности. Вместо того, чтобы указывать права доступа к каждому объекту для каждого пользователя, требуется реализовать разграничительную политику доступа для ролей, с которыми соотносятся пользователи. На самом деле ролевая модель — это не что иное, как дискреционный контроль доступа при соответствующей групповой политике (разграничительной политике для групп пользователей). К достоинствам данной модели можно отнести возможность формализации ролей, т.е. возможность задания и последующего тиражирования неких типовых разграничительных политик доступа для соответствующих ролей, которые в системе могут задаваться „по умолчанию“ (поставляться вместе с системой). Подобное решение реализовано в системе SELinux (Security-Enhanced Linux) — Linux, обладающей повышенной безопасностью.

Существующие абстрактные модели контроля доступа и реализующие их методы предусматривают использование в разграничительной политике доступа двух равноправных сущностей — субъекта и объекта доступа, а назначением правил задаются права доступа субъектов к объектам (и наоборот). При этом в качестве субъектов доступа в разграничительной политике выступают пользователи, действия которых потенциально могут нанести вред.

Остановимся на ключевом недостатке известных подходов к реализации контроля доступа применительно к защите данных, обрабатываемых в информационных системах. Файлы в системе принципиально различаются своим функциональным назначением. Они могут быть разделены на статичные (системные) и создаваемые пользователями в процессе работы. Принципиальная разница между этими группами файловых объектов при задании разграничительной политики доступа к ним состоит в том, что статичные объекты присутствуют в системе на момент назначения администратором правил доступа субъектов к объектам, а создаваемых объектов еще нет. Возникает вопрос: как же администратору при принудительном управлении потоками информации разграничивать права доступа субъектов к объектам, если они еще не созданы. Это противоречие иллюстрирует всю нелогичность известной схемы контроля доступа при принудительном управлении потоками информации.

В современных условиях процесс (приложение) несет в себе не меньшую, если не большую, угрозу несанкционированного доступа к обрабатываемой информации, чем пользо-

ватель [7, 8]. Как следствие, равноправными сущностями, определяющими субъект доступа в разграничительной политике, должны выступать как пользователь (учетная запись), так и процесс (полнопутевое имя исполняемого файла процесса). Для защиты от обхода в современной разграничительной политике доступа имеет смысл идентифицировать субъект тремя сущностями [9]:

— „исходный идентификатор пользователя“ (учетная запись, под которой запущен процесс);

— „эффективный идентификатор пользователя“ (учетная запись, под которой процесс, соответствующий поток, запрашивает доступ к объекту);

— „процесс“.

В работе [10] предложен метод контроля доступа, в значительной мере упрощающий эту задачу за счет назначения прав доступа субъектов к объектам (а не наоборот). Упрощение задачи управления достигается использованием масок при задании субъектов и объектов доступа в разграничительной политике, что позволяет обеспечить новые свойства защиты [11]. Технические решения для различных способов идентификации субъекта доступа [12, 13] реализованы и апробированы. Однако их целесообразно применять для реализации контроля доступа к статичным объектам — ресурсам, присутствующим в системе на момент задания администратором разграничительной политики доступа (например, к системным файлам, объектам реестра ОС, сетевым объектам, внешним накопителям и т.д. [10]).

Принципы контроля доступа к создаваемым объектам основаны на их автоматической разметке при создании или модификации [14, 15]. Это позволяет исключить сущность „объект доступа“ из разграничительной политики доступа. Правила доступа устанавливаются между сущностями „субъект доступа (учетная информация), запрашивающий доступ к объекту“ и „субъект доступа, создавший этот объект“. При создании (модификации) объекта субъектом объект наследует учетную информацию данного субъекта — реализуется разметка объекта (учетная информация субъекта сохраняется в атрибутах созданного им объекта).

При запросе доступа к любому объекту диспетчер доступа (решающий элемент) получает разметку этого объекта, считывает его атрибуты, анализирует запрос на соответствие заданным правилам доступа и предоставляет запрошенный субъектом доступ к объекту либо отказывает в нем.

Таким образом, реализуется разграничительная политика (задаются правила доступа) не для субъектов к объектам, а между субъектами доступа к создаваемым ими объектам. В этом случае реализуется доступ субъектов к объектам, но в разграничительной политике объекты отсутствуют — присутствуют только субъекты доступа.

Рассмотрим реализацию контроля доступа к файловым объектам и к буферу обмена как к создаваемым объектам, используемым в системе для хранения данных.

Методы контроля доступа к создаваемым файлам. *Мандатный метод контроля доступа* к создаваемым файлам предполагает задание уровней безопасности (уровней доступа или меток безопасности), мандатов исключительно пользователям (интерактивным пользователям). Назначения меток безопасности объектам доступа не требуется [16].

Рассмотрим работу диспетчера доступа.

Метки безопасности назначаются тем контролируемым пользователям, которые создают файлы, требующие разграничения права доступа. При создании файла любым пользователем (не только тем, которому назначена метка безопасности) файл автоматически размечается диспетчером доступа: в атрибуты создаваемого файла автоматически помещаются учетные данные субъекта (в данном случае его уровень безопасности), создавшего этот файл. Подобным образом будет размечен при модификации и неразмеченный ранее файл.

Размечать все создаваемые файлы требуется для защиты от запуска вредоносных программ. Эффективная защита от такой угрозы реализуется, когда исполнение создаваемых в процессе работы системы файлов, в том числе и с системными правами, запрещено [17].

Запрашиваемый доступ к неразмеченному файлу будет разрешен, при этом в случае модификации файла он будет автоматически размечен. Если запрошен доступ на исполнение к размеченному файлу, запрос доступа отклоняется. При запросе доступа к файлу иного типа определяется, имеет ли метку безопасности пользователь, запросивший доступ к этому файлу. При отсутствии метки запрос доступа отклоняется диспетчером. Если метка безопасности есть, диспетчер анализирует соответствие запроса мандатным правилам доступа, арифметически сравнивая соответствующие метки (мандаты). Для этого диспетчер определяет и сравнивает (по соответствующим учетным записям) мандаты, а именно, числовые значения назначенных уровней доступа пользователя, запросившего доступ к размеченному файлу, и пользователя, создавшего этот файл. Запрошенный доступ либо разрешается (если запрос не противоречит заданным правилам мандатного контроля), либо отклоняется. Таким образом, достигается принципиальное упрощение задачи управления средством защиты.

Рассмотренный метод обеспечивает, кроме того, корректное решение задачи контроля и разграничений прав доступа в общем случае. В процессе работы пользователями создаются и модифицируются файлы в различных каталогах, но существуют папки коллективного доступа, к которым необходимо разрешить полный доступ всем пользователям. Для корректной реализации схемы контроля доступа известными методами эти файлы (либо папки) должны быть выявлены и им не должны присваиваться метки безопасности, иначе не обеспечить коллективный доступ, что противоречит самой идее мандатной схемы контроля доступа [16]. При реализации же контроля доступа к создаваемым файлам любой файл, создаваемый в любой папке, будет принудительно размечаться и права доступа к нему будут разграничиваться.

Корректная разграничительная политика доступа, построенная на основе мандатного метода контроля доступа к категоризованной по уровням конфиденциальности информации, использует иерархические метки безопасности, которые сравниваются исключительно на идентичность [18]. Это используется и при реализации сессионного контроля доступа [19], корректное построение которого определяется условием задания режимов обработки информации различных уровней конфиденциальности для различных учетных записей пользователей. При реализации сессионного контроля доступа упрощение задачи администрирования мандатного контроля доступа приобретает первостепенное значение.

Дискреционный метод контроля доступа. При дискреционном методе контроля задача упрощения управления системой защиты еще более актуальна, поскольку субъект доступа должен идентифицироваться тремя вышеназванными сущностями. Для пояснения реализации метода воспользуемся интерфейсами настройки разработанного средства защиты, реализующего дискреционный метод контроля доступа к создаваемым файлам. Интерфейс создания и отображения заданных субъектов доступа в системе защиты представлен на рис. 1 [20].

При задании идентификатора пользователя, как исходного (первичного), так и эффективного, можно использовать маску „*“ — „Любой“ (заданные правила распространяются на всех пользователей). Имя процесса может быть задано либо полнопутьным именем исполняемого файла, либо маской (возможно также использование переменных среды окружения). Например, маской C:\ProgramFile* определяются все исполняемые файлы из обозначенного каталога, маской „*“ задается применимость правила к любому процессу. Поскольку один и тот же реальный субъект доступа в разграничительной политике может определяться одновременно несколькими масками, то при анализе запроса доступа диспетчер выбирает из разграничительной политики доступа правило для анализа, наиболее точно соответствующего описанию субъекта доступа.

Правила доступа задаются администратором из интерфейса, представленного на рис. 2 (субъекты доступа здесь отображаются присвоенными им при создании именами, см. рис. 1).

Отметим, что в назначаемые права доступа (см. рис. 2) не внесено право „исполнение“, так как запрет исполнения по умолчанию должен быть установлен для всех создаваемых файлов.

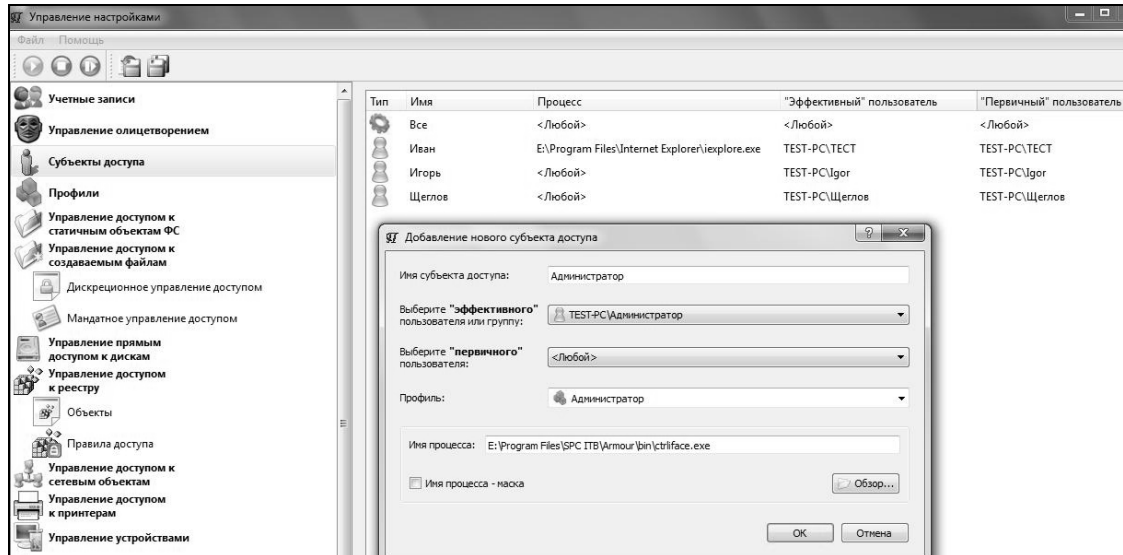


Рис. 1

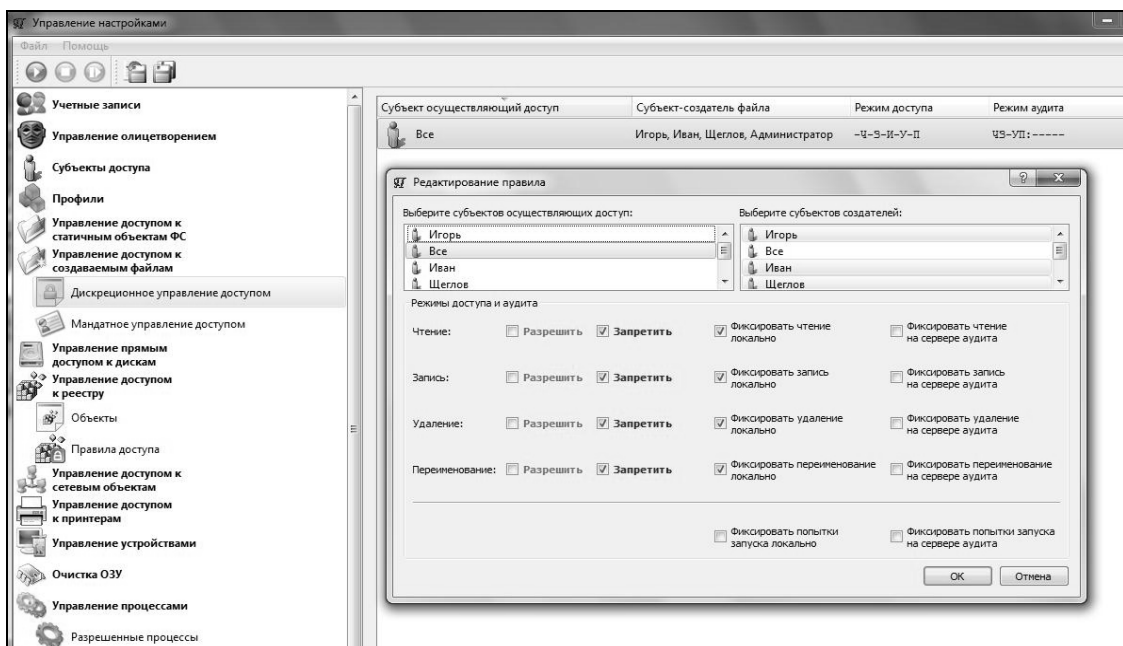


Рис. 2

Задание разграничительной политики доступа осуществляется следующим образом. Из списка заданных субъектов, отображаемого в интерфейсе настройки правил доступа (см. рис. 2), в поле „Выберите субъектов-создателей“ выбираются субъекты доступа, которые создают файлы с ограниченными правами доступа к ним других субъектов. Для выбранного в данном поле контролируемого субъекта-создателя файла назначаются права доступа к создаваемым им файлам других субъектов. Субъект, которому назначаются права доступа, выбирается в поле „Выберите субъектов, осуществляющих доступ“. Для выбранной пары субъектов (в левом и правом полях интерфейса) разрешаются либо запрещаются отдельные права доступа (чтение, запись, удаление, переименование). Требования к правилам доступа, выполнение

которых позволяет построить безопасную систему защиты от утечки прав доступа, сформулированы и обоснованы на основе абстрактной модели Харрисона — Руззо — Ульмана [20].

При реализации разграничительной политики доступа к создаваемым файлам мандатный и дискреционный механизмы контроля доступа могут использоваться совместно. При этом запрос доступа будет считаться санкционированным в случае, если он не будет противоречить ни мандатным, ни дискреционным правилам доступа. При этом диспетчер доступа сначала анализирует мандатные правила доступа, затем дискреционные.

Дискреционный метод контроля доступа к создаваемым файлам позволяет решать задачи защиты информации от атак, направленных на использование уязвимостей приложений, — в подобных разграничительных политиках доступа именно приложение рассматривается в качестве наиболее вероятного источника угрозы несанкционированного доступа. Любые приложения и любые их группы можно изолировать друг от друга по используемым данным [21]. Например, используя всего несколько правил в разграничительной политике доступа, можно изолировать работу интернет-браузера (либо иных по каким-либо соображениям критичных приложений), предотвратив его доступ к данным, обрабатываемым иными приложениями.

Проиллюстрируем, насколько меняется модель контроля доступа при реализации рассмотренных методов контроля доступа к создаваемым объектам.

Модель контроля доступа. Рассмотрим абстрактную модель Харрисона — Руззо — Ульмана [3]. Если считать, что $C = \{C_1, \dots, C_l\}$ и $O = \{O_1, \dots, O_k\}$ — линейно упорядоченные множества субъектов и объектов доступа соответственно, а $R = \{w, r, x, d\}$ — конечное множество прав доступа (запись, чтение, исполнение, удаление), то разграничительная политика доступа субъектов к объектам описывается матрицей доступа M ; $M[C, O]$ — ячейка матрицы, которая содержит набор прав доступа субъекта из множества $C = \{C_1, \dots, C_l\}$ к объекту из множества $O = \{O_1, \dots, O_k\}$. В любой момент времени система описывается своим текущим состоянием $Q = (C, O, M)$. Разграничительная политика доступа субъектов к объектам отображается матрицей M :

$$M = \begin{matrix} & O_1 & O_2 & O_k \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{l-1} \\ C_l \end{matrix} & \begin{bmatrix} r, w, d & w & 0 \\ r & r, w, d & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & r \\ 0 & w & r, w, d \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

В этой модели требование к построению безопасной системы формулируется следующим образом: для заданной системы состояние $Q_0 = (C_0, O_0, M_0)$ следует считать безопасным относительно некоторого права R , если не существует применимой к Q_0 последовательности действий, в результате выполнения которых субъектом C_0 приобретает право R доступа к объекту O_0 , исходно отсутствующее в ячейке матрицы $M_0[C_0, O_0]$. Если же право R , отсутствующее в ячейке матрицы $M_0[C_0, O_0]$, приобретает субъектом C_0 , то считается, что произошла утечка права R , а система небезопасна относительно права R .

При реализации принципов контроля доступа к создаваемым объектам, как установлено выше, объект доступа исключается из разграничительной политики и, как следствие, из матрицы доступа M . Абстрактная модель контроля доступа в этом случае принимает иной вид.

Если считать, что $C = \{C_1, \dots, C_l\}$ — линейно упорядоченное множество субъектов доступа, а $R = \{w, r, x, d\}$ — конечное множество прав доступа (запись, чтение, исполнение, удаление) субъекта C_i к объекту, созданному субъектом C_j , $i=1, \dots, l, j=1, \dots, l$, то матрица доступа M имеет следующий вид (условимся в строках матрицы указывать учетную информацию

субъектов, запрашивающих доступ к объектам, а в столбцах — учетную информацию субъектов, унаследованную созданными объектами, к которым запрашивается доступ):

$$M = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_l \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{l-1} \\ C_l \end{matrix} & \begin{bmatrix} r, w, d & w & 0 \\ r & r, w, d & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & r \\ 0 & w & r, w, d \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Как видим, в любой момент времени система описывается своим текущим состоянием $Q = (C, S, M)$, где $M[C, C]$ — ячейка матрицы, содержащая набор прав доступа.

Реализация предложенных решений позволяет принципиально пересмотреть подходы к построению систем обнаружения (и предотвращения) вторжений уровня хоста, основанных на мониторинге (по журналам аудита) действий приложений. Вторжение обнаруживается и может быть предотвращено, предотвращаются атаки, следующие за вторжением (более полно эти вопросы рассмотрены в работе [21]), причем все это осуществляется в реальном времени.

Метод контроля доступа к буферу обмена. Буфер обмена предназначен для временного хранения данных, используемых для обмена между приложениями. Поскольку на момент задания администратором разграничительной политики доступа эти данные еще не созданы, то можно говорить о контроле и разграничении прав доступа к создаваемым объектам (к данным, временно сохраняемым в буфере обмена). Поэтому в данном случае имеет смысл применить предложенные принципы контроля и разграничения прав доступа. С учетом же назначения буфера обмена основным субъектом доступа в разграничительной политике должен выступать процесс.

Субъекты доступа задаются из интерфейса, представленного на рис. 1, а правила доступа субъектов к буферу обмена — из интерфейса, аналогичного приведенному на рис. 2, но используется лишь одно правило — разрешение/запрет субъекту на получение информации из буфера обмена, помещенной в буфер обмена другим субъектом.

Такой механизм защиты, совместно с механизмом контроля доступа к создаваемым файлам, позволяет реализовать полностью изолированную обработку данных отдельными приложениями (группами приложений) в информационной системе.

Изменение технологии защиты данных в информационной системе. Рассмотрим, как практическое использование методов контроля и разграничения прав доступа к создаваемым объектам сказывается на технологии защиты данных в информационной системе на примере решения задач защиты данных — задач гарантированного удаления и шифрования файлов.

Далеко не все данные, записанные на жестком диске или на внешнем накопителе, образуют файлы. Как правило, на диске присутствует так называемая остаточная информация. Дело в том, что при удалении файла штатными средствами ОС собственно данные не удаляются, а осуществляется переразметка MFT-таблицы (Windows). Эти данные невозможно прочитать, обратившись к файлу (они не образуют файла), но достаточно просто получить к ним доступ с использованием сторонних программ прямого доступа к диску.

Задача предотвращения появления на накопителе обрабатываемых данных в виде остаточной информации — это отдельная важная задача защиты информации, решаемая механизмом гарантированного удаления файлов. Запрос на удаление файла перехватывается средством защиты, и в удаляемый файл записывается заданное число раз исходно заданная администратором информация, после чего управление передается системе для „удаления“ штатными средствами ОС. В результате в качестве остаточной информации на накопителе будут

скапливаться данные, которые средством защиты принудительно записываются в файл перед его удалением.

При реализации методов контроля доступа к файлам правила гарантированного удаления должны устанавливаться в отношении конкретных объектов доступа — файловых объектов, в которых предполагается сохранение пользователями конфиденциальной информации.

Использование подобного решения связано, опять же, с вопросами корректности и сложности администрирования. Дело в том, что гарантированно удалять необходимо файлы не только из папок, предназначенных для хранения файлов с конфиденциальными данными, но и из всех временных файлов, которые создаются большинством приложений. Однако при удалении временного файла системой данные также будут храниться в виде остаточной информации на диске. Это многократно усложняет настройку подобного механизма защиты и ставит под сомнение возможность корректного решения задачи такой защиты в принципе.

Рассмотрим, как изменится реализация механизма защиты, в случае если система защиты основана на методе контроля доступа к создаваемым файлам. Описанное выше гарантированное удаление файлов здесь не может быть применимо, так как любой файл любым субъектом может быть создан в любом объекте (в любой папке), что априори не позволяет исходно задать правила гарантированного удаления путем задания объектов.

Однако созданный файл однозначно описывается разметкой. Это позволяет реализовать метод гарантированного удаления, основанный на автоматической разметке файлов [22]. Настройкой средства защиты создаются правила гарантированного удаления — задаются субъекты, идентифицируемые своими именами либо уровнями доступа (при мандатном контроле), и файлы, созданные ими, должны гарантированно удаляться. При запросе на удаление любого файла средством защиты считывается разметка файла, анализируются заданные правила и принимается решение о необходимости гарантированного удаления этого файла. Как видим, решение задачи реализуется простейшими настройками соответствующего механизма защиты и корректно в общем случае — где бы контролируемым субъектом не был создан файл, он будет гарантированно удален.

Все сказанное относится и к решению задачи автоматического шифрования создаваемых файлов. Именно эти файлы, используемые для хранения обрабатываемых данных, и требуется хранить в зашифрованном виде.

Очевидно, что при использовании в системе методов, реализующих разграничительную политику доступа субъектов к объектам, администратору необходимо задавать файловые объекты, включая файловые накопители данных, сохраняемых субъектом, в которых эти данные будут автоматически зашифровываться. Это трудоемкая задача, а ошибка управления здесь крайне критична, так как может привести к утечке конфиденциальной информации. Чтобы предотвратить подобные потенциальные „каналы“ утечки, администратору необходимо выявить все подобные файлы и задать применительно к ним режим записи с шифрованием.

В случае использования метода (мандатного или дискреционного либо обоих одновременно) контроля доступа к создаваемым файлам в системе защиты может быть решена задача принудительного для субъекта доступа хранения информации в зашифрованном виде. При этом для настройки правил шифрования файлов потребуются задавать не объекты доступа — папки, в которых сохраняемые данные будут зашифровываться, а субъекты доступа (при мандатном контроле — уровни доступа или метки безопасности), созданные которыми данные, где бы они не сохранялись, будут автоматически зашифрованы. Учетной же информации субъекта, сохраняемой в качестве атрибута создаваемого (модифицируемого) файла в незашифрованном виде (она не является секретной информацией), вполне достаточно, чтобы выбрать ключ для расшифровывания файла, где бы (в какой бы папке) он не был создан [23]. Таким образом, получено принципиальное упрощение задачи администрирования и корректное решение задачи защиты в общем случае.

Заключение. Практическое применение предложенных методов контроля доступа к создаваемым объектам позволяет защиту данных и системных объектов представить как совершенно различные задачи защиты, что принципиально меняет требования к их решению в дополнение к реализации разграничительной политики доступа к файловым объектам. Это позволяет говорить именно о новой технологии (как о совокупности взаимосвязанных методов) защиты данных, обрабатываемых в информационной системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Девянин П. Н.* Модели безопасности компьютерных систем. М.: Изд. центр „Академия“, 2005.
2. *Цирлов В. Л.* Основы информационной безопасности автоматизированных систем. Ростов-на-Дону: Феникс, 2008.
3. *Harrison M., Ruzzo W., Ullman J.* Protection in operating systems // Communication of ACM. 1976.
4. *Щеглов А. Ю.* Защита компьютерной информации от несанкционированного доступа. СПб: Наука и техника, 2004.
5. *Bell D. E., LaPadula L. J.* Secure computer systems: unified exposition and multics interpretation // Tech. Rep. MTR-2997, Vol. 4 — Mitri Corp., Bedford, MA, 1976.
6. Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от НСД к информации. М., 1992.
7. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Защита от атак со стороны приложений, наделяемых вредоносными функциями. Модели контроля доступа // Вопросы защиты информации. 2012. Вып. 99, № 4. С. 31—36.
8. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Защита от атак на уязвимости приложений. Модели контроля доступа // Вопросы защиты информации. 2013. Вып. 101, № 2. С. 36—43.
9. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Методы идентификации и аутентификации пользователя при доступе к файловым объектам // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 10. С. 47—51.
10. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Контроль доступа к статичным файловым объектам // Вопросы защиты информации. 2012. Вып. 97, № 2. С. 12—20.
11. *Маркина Т. А., Щеглов А. Ю.* Метод защиты от атак типа drive-by загрузка // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 4. С. 15—20.
12. Пат. 2534599 РФ. Система контроля доступа к ресурсам компьютерной системы с субъектом доступа „пользователь, процесс“ / *А. Ю. Щеглов, К. А. Щеглов.* Приор. 30.04.2013.
13. Пат. 2534488 РФ. Система контроля доступа к ресурсам компьютерной системы с субъектом „исходный пользователь, эффективный пользователь, процесс“ / *А. Ю. Щеглов, К. А. Щеглов.* Приор. 18.06.2013.
14. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Принцип и методы контроля доступа к создаваемым файловым объектам // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 7. С. 43—47.
15. Пат. 2524566 РФ. Система контроля доступа к файлам на основе их автоматической разметки / *А. Ю. Щеглов, К. А. Щеглов.* Приор. 18.03.2013.
16. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Реализация метода мандатного доступа к создаваемым файловым объектам // Вопросы защиты информации. 2013. Вып. 103, № 4. С. 16—20.
17. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Защита от вредоносных программ методом контроля доступа к создаваемым файловым объектам // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 8. С. 46—51.
18. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Модели и правила мандатного контроля доступа // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 5. С. 44—49.
19. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Метод сессионного контроля доступа к файловым объектам. Вопросы практической реализации // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 8. С. 54—60.
20. *Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.* Практическая реализация дискреционного метода контроля доступа к создаваемым файловым объектам // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 4. С. 43—49.

21. Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Защита от атак на уязвимости приложений // Информационные технологии. 2014. № 9. С. 34—39.
22. Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Принципы реализации дополнительной защиты информации при контроле доступа к создаваемым файловым объектам на основе их автоматической разметки // Вопросы защиты информации. 2014. Вып. 104, № 1. С. 29—34.
23. Пат. 2533061 РФ. Система контроля доступа к шифруемым создаваемым файлам / А. Ю. Щеглов, К. А. Щеглов. Приор. 26.06.2013.

Сведения об авторах

- Константин Андреевич Щеглов** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: info@npp-itb.spb.ru
- Андрей Юрьевич Щеглов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: info@npp-itb.spb.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
07.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Новый подход к защите данных в информационной системе // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 157—166.

NEW APPROACH TO DATA SECURING IN INFORMATION SYSTEM

K. A. Shcheglov, A. Yu. Shcheglov

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: info@npp-itb.spb.ru

A new method of securing data processed in information system is considered. The approach is based on realization of control of access to newly created object (file, clipboard) in order to exclude the object from the access policy due to automatic marking on newly created objects. Practical realization of the method is illustrated by an example of patented, implemented, and approved technical solution. Application of the proposed approach is shown to change all requirements to other security mechanisms designed to solve problems other than access rights control and restriction and therefore generates a new information system data securing technology.

Keywords: information system, data security, unauthorized access, access rights control and restriction, access policy, newly created object.

Data on authors

- Konstantin A. Shcheglov** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Computer Science, E-mail: info@npp-itb.spb.ru
- Andrey Yu. Shcheglov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Computer Science, E-mail: info@npp-itb.spb.ru

Reference for citation: Shcheglov K. A., Shcheglov A. Yu. New approach to data securing in information system // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 157—166 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-157-166

ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

И. Ю. ПАРАМОНОВ, В. А. СМАГИН, В. Н. ХАРИН

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ivan_paramonov@mail.ru

Исследуется простейшая восстанавливаемая информационная система и оценивается эффективность ее функционирования в условиях техногенного риска.

Ключевые слова: информационная система, эффективность, риск, вероятность, процесс восстановления, количество информационной работы, стационарная информационная рентабельность.

Введение. В научно-технической литературе рассматриваются различные модели информационных систем, при построении которых учитывается фактор риска [1, 2]. Так, в монографии [1] представлен логико-вероятностный метод исследования таких систем. Метод оценивания качества систем с использованием показателя эффективности функционирования и показателя риска с привлечением различных методов оптимизации предложен в работе [3], где целевая функция системы определена как функция от двух указанных показателей; при этом необходимо, чтобы показатель риска был аргументом эффективности функционирования наряду с другими первичными показателями качества.

Постановка задачи. Структура системы, предназначенной для сбора и обработки информации, неизбыточна, т.е. не содержит резервных элементов. В случае технического отказа система мгновенно начинает восстанавливаться в течение случайного времени, после чего вновь продолжает функционировать с заданным качеством. Заданы функции распределения времени работы системы до ее отказа ($A(t)$) и времени восстановления ($G(t)$). Граф состояний системы показан на рис. 1, где $a(t)$ — плотность распределения вероятности времени работы системы до отказа, $g(t)$ — плотность вероятности времени восстановления.

В исправном состоянии „0“ система выполняет информационную работу с производительностью I_0 операций/ч, если внешнее воздействие отсутствует. В состоянии восстановления „1“ количество выполненной работы расходуется с производительностью I_1 операций/ч. После восстановления системы процесс повторяется. Требуется определить количество выполненной информационной работы в зависимости от времени функционирования системы.

Общее решение. Рассмотрим процесс функционирования системы, представленный в виде последовательных циклов „работа — восстановление“. Определим количество выполненной информационной работы и количество „потерянной“ работы в каждом цикле.

Первый цикл. Количество выполненной информационной работы определяется выражением

$$W_1(t) = I_0 t P(t), \quad (1)$$

где $P(t) = 1 - A(t)$ — вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии „0“ в течение времени t ; количество „потерянной“ информационной работы определяется выражением

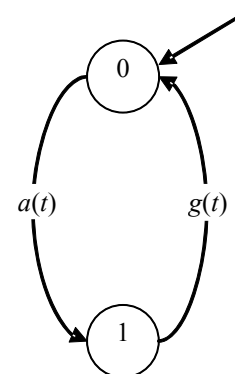


Рис. 1

$$Q_1(t) = -I_1 \int_0^t a(z) \int_0^{t-z} ug(u) du dz, \quad (2)$$

где $a(z) = a(t)$, $g(u) = g(t)$.

Для краткости представим выражения (1) и (2), используя преобразование Лапласа (s):

$$W_1(s) = I_0 \frac{1 - a(s) + s a'(s)}{s^2};$$

$$Q_1(s) = -I_1 a(s) \frac{1 - g(s) + s g'(s)}{s^2},$$

здесь „штрих“ означает производную от функции по s .

Второй цикл. В этом цикле

$$W_{II}(t) = I_0 \int_0^t a(z) \int_0^{t-z} ug(u) P(t-u-z) du dz, \quad (3)$$

$$Q_{II}(t) = -I_1 \int_0^t a(z) \int_0^{t-z} g(u) \int_0^{t-z-u} a(y) \int_0^{t-z-u-y} xg(x) dx dy du dz. \quad (4)$$

В преобразовании Лапласа формулы (3) и (4) принимают вид

$$W_{II}(s) = I_0 a(s) g(s) \frac{1 - a(s) + s a'(s)}{s^2},$$

$$Q_{II}(s) = -I_1 a(s)^2 g(s) \frac{1 - g(s) + s g'(s)}{s^2}.$$

Третий цикл. По аналогии со вторым циклом получим:

$$W_{III}(s) = I_0 a(s)^2 g(s)^2 \frac{1 - a(s) + s a'(s)}{s^2},$$

$$Q_{III}(s) = -I_1 a(s)^3 g(s)^2 \frac{1 - g(s) + s g'(s)}{s^2}.$$

Аналогично можно получить преобразования Лапласа для величин $W(t)$ и $Q(t)$ в любых циклах процесса. Суммируя преобразования отдельно по всем циклам, окончательно получаем:

$$W(s) = I_0 \frac{1 - a(s) + s a'(s)}{s^2 (1 - a(s) g(s))}, \quad (5)$$

$$Q(s) = -I_1 a(s) \frac{1 - g(s) + s g'(s)}{s^2 (1 - a(s) g(s))}. \quad (6)$$

Пример. Для параметров системы заданы следующие значения: $I_0=10$ операций/ч, $I_1=3$ операций/ч, $\lambda = 0,01 \text{ ч}^{-1}$, $\mu = 0,1 \text{ ч}^{-1}$, $a(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, $g(t) = \mu e^{-\mu t}$, $P(t) = e^{-\lambda t}$, где λ и μ — интенсивность отказа и восстановления системы соответственно.

С учетом заданных значений согласно формулам (1) и (2) построены графические зависимости $W_1(t)$, $Q_1(t)$: см. рис. 2 — кривые 1 и 2 соответственно.

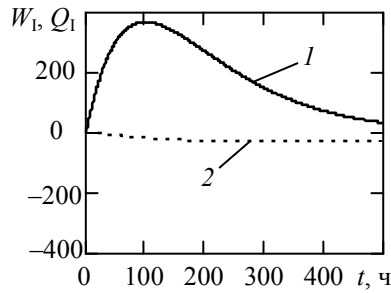


Рис. 2

Далее по формулам (3) и (4) построены зависимости $W_{II}(t)$ и $Q_{II}(t)$: см. рис. 3 — кривые 1 и 2 соответственно.

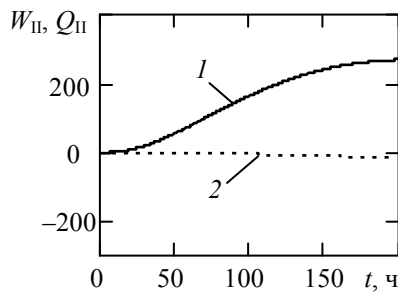


Рис. 3

Сравнительный анализ графиков (см. рис. 2, 3) показывает, что с увеличением номера цикла количество „эффективной“ информационной работы уменьшается.

Оценивание эффективности системы в стационарном состоянии. На основе предельной теоремы тауберова типа для экспоненциальных распределений получим

$$\lim_{s \rightarrow 0} (s W^*(s)) = \frac{I_0}{\lambda} \frac{\mu}{\mu + \lambda}, \quad (7)$$

что эквивалентно I_0TK , где $T = \int_0^{\infty} P(z) dz$ — среднее время безотказной работы системы,

K — коэффициент готовности системы;

$$\lim_{s \rightarrow 0} (s Q^*(s)) = \begin{cases} -\frac{I_1}{\mu} \frac{\lambda}{\mu + \lambda}, & \text{если } \mu^2 + \lambda\mu \neq 0, \\ I_1 \lambda \operatorname{sgn}(\mu^2 + \lambda\mu), & \text{если } \mu^2 + \lambda\mu = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Первая строка в выражении (8) эквивалентна $-I_1 T_B (1 - K)$, где T_B — среднее время восстановления системы, а $(1 - K)$ — коэффициент простоя системы.

Вычисление предельных соотношений вида (7) и (8) при неэкспоненциальных законах распределения более сложно, поэтому примем полученные формулы в качестве приближенных для любых распределений вероятностей.

На основе предельных стационарных оценок (7), (8) можно оценить и так называемую „предельную стационарную рентабельность“ информационной системы путем вычисления отношения „эффективной“ информационной работы к количеству выполненной за весь период функционирования системы:

$$C = \frac{I_0TK - I_1T_B(1 - K)}{I_0TK} = \frac{(I_0T + I_1T_B)K - I_1T_B}{I_0TK}. \quad (9)$$

Подставив численные значения параметров, принятые в примере, и учитывая, что $K = T / (T + T_B) = 0,9$, $I_0TK = 900$ операций, $(I_0T + I_1T_B)K - I_1T_B = 0,897$ операций, получим: $C = 0,997$.

Оценивание эффективности системы с учетом риска. Влияние внешних воздействий на работу системы может привести к снижению показателя ее информационной эффективности. Положим, что негативные факторы оказывают влияние на систему, только когда она находится в работоспособном состоянии.

Пусть злоумышленник многократно воздействует на систему в процессе ее функционирования. Предположим, что он обладает информацией о начальных моментах и продолжительности „продуктивной“ работы системы.

Рассмотрим первый цикл функционирования системы. Примем, что момент начала цикла и момент внешнего воздействия на систему совпадают, т.е. оба процесса синхронизированы. Обозначим через $R(t)$ вероятность недостижения цели злоумышленником. Тогда выражение (1) преобразуется к виду

$$W_1(t) = I_0 t P(t) R(t). \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим случай, когда $R(t) = R = \text{const}$. Для первого и второго циклов выражения (1) и (3) примут следующий вид:

$$W_1(K) = \frac{I_0KT + I_1T_B(1-K)}{I_0KT},$$

$$W_{II}(K) = \frac{I_0KTR + I_1T_B(1-K)}{I_0KTR}.$$

На рис. 4 представлен график, построенный в соответствии выражением (10) для стационарного случая при $R = 1$ и $R = 0,5$ (кривые 1 и 2 соответственно)

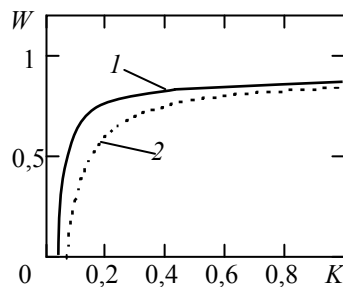


Рис. 4

Для стационарного случая при произвольных зависимостях $P(t)$ и $R(t)$ необходимо выполнить достаточно сложные вычисления. Приведем здесь алгоритм вычислений лишь в схематическом виде. Вначале следует произвести преобразование Лапласа произведения $P(t) \cdot R(t)$ по формуле

$$L(s) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} P(z) R(s-z) dz.$$

Затем необходимо использовать оператор

$$t P(t) R(t) \rightarrow -\frac{dL(s)}{ds}$$

и полученный результат умножить на величину I_0 . Далее следует воспользоваться выражениями (5) и (6) для нахождения стационарных значений W и Q при $s \rightarrow 0$ по формулам (7) и (8). И лишь после этого можно вывести выражение, аналогичное формуле (9), для определения „предельной стационарной рентабельности“ системы.

З а м е ч а н и е. В статье исследуется такая характеристика восстанавливаемой системы, как количество информационной работой, при этом не учитывается, что „стареющие“ системы не являются полностью восстанавливаемыми, контроль за возможными состояниями не является идеальным и т.д. Интерес к данной тематике вызван тем, что современные сетевые системы состоят из восстанавливаемых информационных элементов, связанных друг с другом и обладающих возможностью выполнять информационную работу даже при снижении пропускной способности. Однако взаимная связь элементов в таких системах позволяет достаточно долго сохранять их устойчивость.

Заключение. Рассмотрена простейшая восстанавливаемая информационная система, имеющая два состояния — исправное и неисправное — при произвольных распределениях времени в обоих состояниях. Контроль состояний идеальный, восстановление системы полное.

Особенность данного исследования заключается в том, что при заданных пропускных способностях узлов системы определяется количество информационной работы, выполненной в одном состоянии и израсходованной в другом. Введен показатель „предельной стационарной рентабельности“ системы, позволяющий оценить ее эффективность при изменении основных параметров.

Предложена модель функционирования информационной системы с учетом техногенного риска и оценены показатели ее эффективности в этих условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб: Изд. дом „Бизнес-пресса“, 2006. 530 с.
2. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности. СПб: „БХВ-Петербург“, 2006. 704 с.
3. Горелик В. А., Золотова Т. В. Общий подход к моделированию процедур управления риском и его применение к стохастическим и иерархическим системам // Управление большими системами. 2012. Вып. 37. С. 5—24.

Сведения об авторах

Иван Юрьевич Парамонов

— канд. техн. наук, докторант; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра метрологического обеспечения; E-mail: ivan_paramonov@mail.ru

Владимир Александрович Смагин

— д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра метрологического обеспечения; E-mail: va_smagin@mail.ru

Виталий Николаевич Харин

— канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра метрологического обеспечения; E-mail: vitaliy76@inbox.ru

Рекомендована кафедрой
метрологического обеспечения

Поступила в редакцию
01.04.14 г.

Ссылка для цитирования: Парамонов И. Ю., Смагин В. А., Харин В. Н. Оценивание эффективности функционирования информационной системы в условиях техногенного риска // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 167—172.

ASSESSING THE OPERATION EFFICIENCY OF INFORMATION SYSTEM UNDER TECHNOGENIC RISK CONDITIONS

I. Yu. Paramonov, V. A. Smagin, V. N. Kharin

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, Saint Petersburg, Russia
E-mail: ivan_paramonov@mail.ru

A simple restorable information system is studied; operation efficiency of the system under technogenic risk conditions is estimated.

Keywords: information system, efficiency, risk, probability, restoration process, information work quantity, stationary information profitability.

Data on authors

- Ivan Yu. Paramonov** — PhD, Doctoral Cand.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Metrological Support; E-mail: ivan_paramonov@mail.ru
- Vladimir A. Smagin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Metrological Support; E-mail: va_smagin@mail.ru
- Vitaly N. Kharin** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Metrological Support; Head of the Department; E-mail: vitaliy76@inbox.ru

Reference for citation: *Paramonov I. Yu., Smagin V. A., Kharin V. N.* Assessing the operation efficiency of information system under technogenic risk conditions // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 3. P. 167—172 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-167-172

УПРОЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ БЭКСТЕППИНГА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ

И. Б. ФУРТАТ¹, Е. А. ТУПИЧИН²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
Институт проблем машиноведения РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: cainenash@mail.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Представлен алгоритм робастного управления параметрически неопределенными нелинейными объектами, основанный на модифицированном методе бэкстеппинга. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие работоспособность рассмотренной схемы.

Ключевые слова: робастное управление, метод бэкстеппинга, нелинейная система.

Введение. На сегодняшний день предложено достаточно много методов и подходов к построению адаптивных и робастных систем управления неопределенными объектами. Особого внимания заслуживает метод бэкстеппинга, впервые предложенный в работе [1] для синтеза адаптивного управления нелинейными объектами по выходу. Использование этого метода позволяет обеспечить в системе управления параметрическую робастность и возможность учета априорной информации о значениях параметров объекта управления. Последнее свойство наглядно продемонстрировано в работе [2], где представлен эффективный алгоритм бэкстеппинга для параметрически неопределенных объектов с измеряемым скалярным выходом. Другие модификации данного метода рассмотрены, например, в работах [3—5]. Однако предложенные в работах [1—5] методы сложны при аналитическом расчете системы управления, что объясняется громоздкостью вычислений полной производной по времени от стабилизирующих сигналов управления. Кроме того, при технической реализации системы возникают трудности, связанные с большим количеством компонентов и фильтров ее состояния, необходимых для формирования закона управления.

В настоящей статье предложен модифицированный метод бэкстеппинга для робастного управления параметрическими неопределенными объектами по выходу. Показано, что в отличие от алгоритма, рассмотренного в работе [6], в предлагаемой системе управления реализуется всего один фильтр размерности, равной порядку модели объекта, а для вычисления производных стабилизирующих сигналов управления используются реальные дифференцирующие устройства. Приведенный в работе [6] результат был обобщен для адаптивно-робастного управления линейными объектами, линейными объектами с запаздыванием и нелинейными объектами [7—9]. Это позволяет существенно упростить аналитический расчет настраиваемых параметров и техническую реализацию системы управления. При этом в замкнутой системе обеспечивается требуемая динамическая точность.

Постановка задачи. Рассмотрим математическую модель объекта управления:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \xi) + b(x(t), \xi)u(t), \quad y(t) = h(x(t)), \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $x(t) \in X \subset R^n$ — вектор состояния; $u(t) \in R$ — управляющее воздействие; $y(t) \in Y \subset R$ — регулируемая переменная; $t \in T \subset (0, \infty)$, $f(x, \xi)$, $b(x, \xi)$ и $h(x)$ — гладкие функции соответствующих

размерностей; $\xi \in \Xi$ — вектор неизвестных параметров; Ξ — известное ограниченное множество; $x_0 \in X$ — вектор начальных условий.

Необходимо синтезировать закон управления, обеспечивающий выполнение целевого условия

$$|y(t) - y_M(t)| < \delta \text{ для } t > t_f, \quad (2)$$

где $\delta > 0$ — показатель точности регулирования, $y_M(t)$ — эталонный сигнал, $t_f > 0$ — время переходного процесса.

Предположение 1. Функции $f(x, \xi)$, $b(x, \xi)$, $h(x)$ — гладкие, и для любых $x(t) \in X$, $\xi \in \Xi$ выполнены следующие условия:

$$L_b h(x) = L_b L_f^1 h(x) = \dots = L_b L_f^{n-2} h(x) = 0, \quad \beta(x, \xi) = L_b L_f^{n-1} h(x) > 0,$$

где $L_f^1 h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x, \xi)$, $L_b h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} b(x, \xi)$ — производная Ли от функции $h(x)$ по направлению векторных полей $f(x, \xi)$, $b(x, \xi)$ соответственно.

Производные высших порядков вычисляются по формулам

$$L_f^2 h(x) = \frac{\partial (L_f h(x))}{\partial x} f(x, \xi), \dots, L_f^k h(x) = \frac{\partial (L_f^{k-1} h(x))}{\partial x} f(x, \xi).$$

Предположение 2. Существует гладкая функция $\varphi^{-1}(x(t))$, такая что

$$\bar{x}(t) = \varphi(x(t)) = [y(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n-1)}(t)]^T = [h(x), L_f^1 h(x), \dots, L_f^{n-1} h(x)]^T.$$

Предположение 3. Функция $c(x, \xi) = L_f^n h(x)$ ограничена или ограничена на множестве Ξ и липшицева по $x \in X$.

Предположение 4. Функции $y_M(t)$, $\dot{y}_M(t)$, ..., $y_M^{(n)}(t)$ — ограниченные.

Аналогичные предположения рассмотрены в работе [10].

Метод решения. Принимая во внимание предположение 1, продифференцируем n раз функцию $y(t)$:

$$p^n y(t) = c(x, \xi) + \beta(x, \xi)u(t), \quad (3)$$

где $p = d/dt$ — оператор дифференцирования.

С учетом выражения (3) запишем уравнение ошибки $e_1(t) = y(t) - y_M(t)$ в виде

$$p^n e_1(t) = c(x, \xi) + \beta(x, \xi)u(t) - p^n y_M(t). \quad (4)$$

Введем в рассмотрение оператор $Q_{n-1}(p) = \sum_{i=0}^{n-1} k_{n-i} p^i$, такой что полином $Q(\lambda) = \lambda^n + Q_{n-1}(\lambda)$ гурвицев, где λ — комплексная переменная, и перепишем уравнение (4) в форме

$$Q(p)e_1(t) = u(t) + \psi(x, \xi, y_M, t), \quad (5)$$

где функция

$$\psi(x, \xi, y_M, t) = c(x, \xi) + (\beta(x, \xi) - 1)u(t) - p^n y_M(t) - Q_{n-1}(p)e_1(t). \quad (6)$$

Рассмотрим фильтр

$$\dot{v}(t) = A_0 v(t) + l u(t), \quad (7)$$

где $v(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]^T$, $A_0 = \begin{bmatrix} -k_1 & & & \\ -k_2 & & I_{n-1} & \\ \vdots & & & \\ -k_n & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$, $I_{n-1} \in R^{(n-1) \times (n-1)}$ — единичная матрица, $l = [0, \dots, 0, 1]^T$.

Перепишем уравнение (5) с учетом выражения (7):

$$e_1(t) = v_1(t) + Q^{-1}(p)\Psi(x(t), \xi, y_M(t), t). \quad (8)$$

Дифференцируя (8), получаем

$$\dot{e}_1(t) = -k_1 v_1(t) + v_2(t) + \tilde{f}(t), \quad (9)$$

где $Q(p)\tilde{f}(t) = p\Psi(x(t), \xi, y_M(t), t)$.

Согласно методу бэкстеппинга [3] представим процедуру синтеза системы управления следующим алгоритмом.

Шаг 1. Предположим, что функция $v_2(t)$ — сигнал управления в выражении (9). Определим $v_2(t)$ в виде $v_2(t) = U_1(t)$ и зададим $U_1(t)$ как функцию, необходимую для стабилизации ошибки (9):

$$U_1(t) = -\alpha_1 \mu^{-1} e_1(t) + k_1 v_1(t), \quad (10)$$

где $\alpha_1 > 0$ и $\mu > 0$ — коэффициенты, выбираемые разработчиком.

Подставив (10) в выражение (9), получим

$$\dot{e}_1(t) = -\alpha_1 \mu^{-1} e_1(t) + \tilde{f}(t). \quad (11)$$

Шаг i ($2 \leq i \leq n-1$). Рассмотрим функцию ошибки $e_i(t) = v_i(t) - U_{i-1}(t)$. Взяв производную от $e_i(t)$ вдоль траекторий (5), получим

$$\dot{e}_i(t) = -k_i v_i(t) + v_{i+1}(t) - \dot{U}_{i-1}(t). \quad (12)$$

Предположим, что функция $v_{i+1}(t)$ — сигнал управления в уравнении (12). Пусть $v_{i+1}(t) = U_i(t)$, тогда

$$U_i(t) = -\alpha_i e_i(t) + k_i v_i(t) + \bar{U}_{i-1}(t), \quad (13)$$

где $\alpha_i > 0$ — коэффициент, выбираемый разработчиком, $\bar{U}_{i-1}(t)$ — оценка сигнала $\dot{U}_{i-1}(t)$.

Подставив (13) в выражение (12), получим

$$\dot{e}_i(t) = -\alpha_i e_i(t) - \eta_{i-1}(t), \quad (14)$$

где $\eta_{i-1}(t) = \dot{U}_{i-1}(t) - \bar{U}_{i-1}(t)$.

Шаг n . Рассмотрим функцию $e_n(t) = v_n(t) - U_{n-1}(t)$. Принимая во внимание уравнение (7) и дифференцируя $e_n(t)$, получаем

$$\dot{e}_n(t) = -k_n v_1(t) + u(t) - \dot{U}_{n-1}(t). \quad (15)$$

Сформируем закон управления

$$u(t) = -\alpha_n e_n(t) + k_n v_1(t) + \bar{U}_{n-1}(t), \quad (16)$$

где $\alpha_n > 0$ — коэффициент, выбираемый разработчиком, $\bar{U}_{n-1}(t)$ — оценка функции $\dot{U}_{n-1}(t)$, с учетом которого перепишем выражение (15):

$$\dot{e}_n(t) = -\alpha_n e_n(t) - \eta_{n-1}(t), \quad (17)$$

где $\eta_{n-1}(t) = \dot{U}_{n-1}(t) - \bar{U}_{n-1}(t)$.

Для оценки производных $\dot{U}_{i-1}(t)$, $i = \overline{2, n}$, воспользуемся следующими наблюдателями

$$\dot{\bar{U}}_{i-1}(t) = -\mu^{-1} \bar{U}_{i-1}(t) + \mu^{-1} \dot{U}_{i-1}(t), \quad i = \overline{2, n}. \quad (18)$$

Утверждение. Пусть выполнены предположения 1—4. Тогда существуют константы $\alpha_i > 0$, $i = \overline{1, n}$, и $\mu_0 > 0$, такие что для $\mu \leq \mu_0$ система управления (7), (10), (13), (16), (18) обеспечивает выполнение целевого условия (2) для объекта (1).

Доказательство утверждения аналогично приведенному в работах [6—9].

Пример. Рассмотрим модель объекта управления:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \xi_1 \sin(x_1(t)) + \xi_2 x_2(t) - \xi_2 x_3(t), \\ \dot{x}_2(t) &= \xi_3 x_1(t) + \xi_4 \sin(x_3(t)) + (1 + x_2^2(t))^{-1} (u(t) + x_2^3(t) + x_3^3(t)), \\ \dot{x}_3(t) &= \xi_5 x_1(t) - x_3^3(t) + (1 + x_2^2(t))^{-1} (u(t) + x_2^3(t) + x_3^3(t)), \\ y(t) &= x(t)_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Множество Ξ задано неравенствами $1 \leq \xi_i \leq 5$, $i = \overline{1, 5}$.

Цель управления — синтез непрерывного закона управления, обеспечивающего выполнение условия (2).

Выберем $k_1 = 3$, $k_2 = 3$, $k_3 = 1$ и зададим фильтр (7) в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1(t) \\ \dot{v}_2(t) \\ \dot{v}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t).$$

Положим $\alpha_1 = 1,2$, $\alpha_2 = \alpha_3 = 110$ и $\mu = 0,01$. Для вспомогательных законов управления $U_1(t)$, $U_2(t)$ и основного закона управления $u(t)$ запишем:

$$U_1(t) = -120e_1(t) + 3v_1(t), \quad U_2(t) = -110e_2(t) + 3v_1(t) + \bar{U}_1(t);$$

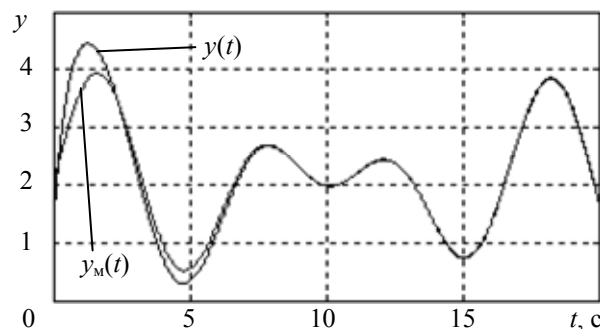
$$u(t) = -110e_3(t) + v_1(t) + \bar{U}_2(t),$$

где $e_1(t) = y(t) - y_m(t)$, $e_2(t) = v_2(t) - U_1(t)$, $e_3(t) = v_3(t) - U_2(t)$.

Определим наблюдатели (18) в виде

$$\bar{U}_1(t) = \frac{p}{0,01p+1} U_1(t), \quad \bar{U}_2(t) = \frac{p}{0,01p+1} U_2(t).$$

Все начальные условия в системе управления — нулевые. Параметры модели (19) определены как $\xi_1 = \xi_4 = 1,2$, $\xi_2 = \xi_3 = \xi_5 = 4,5$, $x(0) = [0,9 \ 0,8 \ 0,9]^T$. Результаты моделирования переходных процессов по выходному ($y(t)$) и эталонному ($y_m(t)$) сигналам управления представлены на рисунке.



Анализ результатов моделирования показал, что параметрическая неопределенность компенсируется системой управления с точностью $\delta = 0,01$ по истечении 8 с. По сравнению с алгоритмами, рассмотренными в работах [11, 12], для обеспечения подобных переходных процессов по ошибке слежения требуется меньшая амплитуда управляющего сигнала.

Заключение. Предложенный алгоритм слежения выходного сигнала нелинейного объекта управления за эталонным сигналом в условиях параметрической неопределенности

построен на базе новой версии метода бэкстеппинга, предложенного в работе [6]. Полученная система управления содержит всего один фильтр размерности, равной размерности модели объекта, а для реализации производных в законах управления используются реальные дифференцирующие звенья. Это позволяет упростить расчет и реализацию системы управления за счет уменьшения ее динамического порядка и сокращения количества слагаемых в законах управления по сравнению с известными аналогами.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-01014), Минобрнауки РФ (проект 14.Z50.31.0031), Правительства РФ (грант 074-U01) и программы ОММПУ-14 РАН; результаты, приведенные в разделе „Метод решения“, получены при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00142) в ИПМаш РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kanellakopoulos I., Kokotović P. V., Morse A. S.* Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems // IEEE Trans. Automatic Control. 1991. Vol. 36. P. 1241—1253.
2. *Нукифоров В. О.* Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб: Наука, 2003.
3. *Khalil H. K.* Nonlinear Systems. N. Y.: Prentice Hall, 2002.
4. *Zheng Y., Yang Y.* Adaptive output feedback control for class of nonlinear systems with unknown virtual control coefficients signs // Adaptive Control and Signal Processing. 2007. Vol. 21, N 1. P. 77—89.
5. *Tanner H. G., Kyriakopoulos K. J.* Backstepping for nonsmooth systems // Automatica. 2003. Vol. 39. P. 1259—1265.
6. *Фуртат И. Б.* Модифицированный алгоритм обратного обхода интегратора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 10. С. 2—7.
7. *Furtat I. B., Tupichin E. A.* Modified simple adaptive-robust backstepping algorithm // Proc. of the 19th Intern. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2014), Międzyzdroje, Poland. 2014. P. 183—188.
8. *Furtat I. B., Tupichin E. A.* Modified robust backstepping algorithm for plants with time delay // Proc. of the 6th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), St. Petersburg, Russia. 2014. P. 541—545.
9. *Furtat I. B., Tupichin E. A.* Control of nonlinear plant based on modified robust backstepping algorithm // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Control Applications (CCA), Antibes, France. 2014. P. 941—946.
10. *Цыкунов А. М.* Робастное управление с компенсацией возмущений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
11. *Фуртат И. Б., Цыкунов А. М.* Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 7. С. 15—19.
12. *Фуртат И. Б.* Робастное субоптимальное управление линейными нестационарными объектами по выходу // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 7. С. 7—12.

Сведения об авторах

Игорь Борисович Фуртат

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики, профессор; ИПМаш РАН, лаборатория управления сложными системами, ведущий научный сотрудник; СПбГУ, кафедра прикладной кибернетики, ведущий научный сотрудник; E-mail: cainenash@mail.ru

Евгений Александрович Тупичин

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: tupichin@mail.ru

Рекомендована лабораторией
управления сложными системами
ИПМаш РАН

Поступила в редакцию
05.11.14 г.

Ссылка для цитирования: *Фуртат И. Б., Тупичин Е. А.* Упрощенный алгоритм бэкстеппинга для управления нелинейными системами // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 173—178.

SIMPLIFIED BACKSTEPPING ALGORITHM FOR CONTROL OF NONLINEAR SYSTEMS

I. B. Furtat¹, E. A. Tupichin²

¹ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
199178, Saint Petersburg, Russia
Saint Petersburg State University, 199034, Saint Petersburg, Russia
E-mail: cainenash@mail.ru

²ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

An algorithm based on the modified backstepping method is proposed for robust control of parametrically uncertain nonlinear plants. Simulation results illustrate the performance of the presented scheme.

Keywords: robust control, backstepping method, nonlinear system.

Data on authors

- Igor B. Furtat** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; IPME RAS, Laboratory Control of Complex Systems; Saint Petersburg State University, Department of Applied Cybernetics; E-mail: cainenash@mail.ru
- Evgeny A. Tupichin** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Control Systems and Informatics; E-mail: tupichin@mail.ru

Reference for citation: Furtat I. B., Tupichin E. A. Simplified backstepping algorithm for control of nonlinear systems // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 3. P. 173—178 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-173-178

МЕТОД АДАПТИВНОГО СЖАТИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. Н. ГРИГОРЬЕВ, Е. А. ДУДИН

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: DudinEA@mail.ru

Предложен метод адаптивного сжатия спутниковых изображений, основанный на использовании банка фильтров прямого/обратного вейвлет-преобразования и ряда решений, обеспечивающих требуемое качество восстановленного изображения при высокой степени сжатия.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, методы сжатия спутниковых изображений, вейвлет-преобразование, лифтинг-схема.

Изображения земной поверхности, зарегистрированные с борта космического аппарата (КА), широко используются сегодня в различных сферах деятельности. Проблема получения таких изображений, однако, связана с противоречием между высокой производительностью бортовой специальной аппаратуры, формирующей большие потоки данных, и низкой пропускной способностью существующих космических каналов передачи информации, что подтверждается характеристиками современных космических систем дистанционного зондирования, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

КА (год запуска)	Оператор (страна)	m , кг	R , м	ν , Мбит/с	Стандарт сжатия	Степень сжатия	V , Гбит
Pleiades-1B (2012)	EADS Astrium Satellites (Франция)	1000	0,7 * 2,8 **	465	Wavelet	4	1000
Канопус-В (2012)	НЦ ОМЗ (Россия)	400	2,7 * 10,5 **	2-122	АДИКМ	3,4	25
Ресурс-П (2012)	НЦ ОМЗ (Россия)	6500	0,5 * 3,0 **	2-150	JPEG-2000	10	128
SPOT-6 (2012)	EADS Astrium Satellites (Франция)	800	2,0 * 8,0 **	300	ICER	2,3	850
Landsat-8 (2013)	USGS (США)	2623	15,0 * 30,0 **	450	ICER	2,3	3140
WorldView-3 (2014)	DigitalGlobe (США)	2800	0,3 * 1,3 **	800	ADPCM	4,3	2200
ALOS-3 (2015)	JAXA (Япония)	2000	0,8 * 5,0 **	800	JPEG-2000	2,3	200

Примечания: m — масса КА; R — пространственное разрешение (* — для панхроматического режима съемки, ** — для многоспектрального режима съемки); ν — скорость передачи информации по каналу связи; V — объем бортового запоминающего устройства.

Указанное выше противоречие в большинстве случаев разрешается применением в бортовой аппаратуре алгоритмов сжатия изображений. Традиционные методы сжатия хорошо известны [1]. Новым направлением их развития является разработка методов адаптивного сжатия неподвижных изображений. Такие методы позволяют осуществлять сжатие изображения в зависимости от его спектра с допустимым уровнем искажений.

Обобщенная структурная схема метода адаптивного сжатия неподвижных изображений показана на рис. 1. Предлагаемый метод базируется на использовании банков вейвлетных

фильтров на основе лифтинг-преобразования, а также процедуры выбора фильтров, которая позволяет минимизировать искажения, вносимые в процессе сжатия/восстановления изображений.



Рис. 1

Рассматриваемый метод состоит из следующих этапов обработки изображения.

1. После оценки параметров спектра текущего фрагмента изображения осуществляется первая итерация выбора фильтров анализа/синтеза.

2. Сигнал подвергается лифтинг-преобразованию, квантованию, энтропийному кодированию и буферизации.

3. Данные буфера восстанавливаются и сравниваются с входным фрагментом. При этом оценивается качество кодирования по показателю степени сжатия и по критериальному значению объективного показателя качества (например, пиковому отношению сигнал/шум PSNR).

4. Параметры фильтров анализа/синтеза модифицируются, что служит началом следующей итерации кодирования фрагмента изображения. Если результаты сравнения после первой итерации дают требуемые значения, то последующие итерации не проводятся.

5. Характеристики банка фильтров поступают в наземный пункт в качестве служебных данных при архивировании и передаче по каналу связи.

Методы сжатия изображений на основе лифтинг-преобразования отличаются высокой скоростью действия, устойчивостью к сбоям, возможностью экономии оперативной памяти, расширенным выбором наборов фильтров и другими свойствами [2]. Характерные особенности лифтинг-преобразования состоят в следующем:

- локализованности во временной и частотной областях;
- наличия быстрых вычислительных алгоритмов;
- симметричности прямого и обратного преобразований.

На рис. 2 приведена схема лифтинг-преобразования, содержащая следующие обозначения: $s_i^{(n)}$ и $d_i^{(n)}$ — четные и нечетные отсчеты входного сигнала, верхний индекс указывает номер шага лифтинг-преобразования, нижний — номер отсчета; P_n — оператор предсказания; U_n — оператор обновления.

Синтезирующая составляющая процесса преобразования (см. рис. 2, б) симметрична анализирующей (рис. 2, а) и отличается изменением знака операции на противоположный. Лифтинг-преобразование реализуется посредством следующих процедур.

1. Разбиение входной последовательности отсчетов сигнала на четную и нечетную составляющие.
2. Предсказание, в ходе которого в исходной последовательности четные отсчеты остаются без изменений, а нечетные заменяются разностью между их истинными значениями и предсказанными значениями нечетных отсчетов, т.е. вейвлет-коэффициентами.
3. Обновление значений четных отсчетов на основе значений вейвлет-коэффициентов в целях устранения эффекта элайзинга, возникающего вследствие многократного применения преобразования к строке изображения.

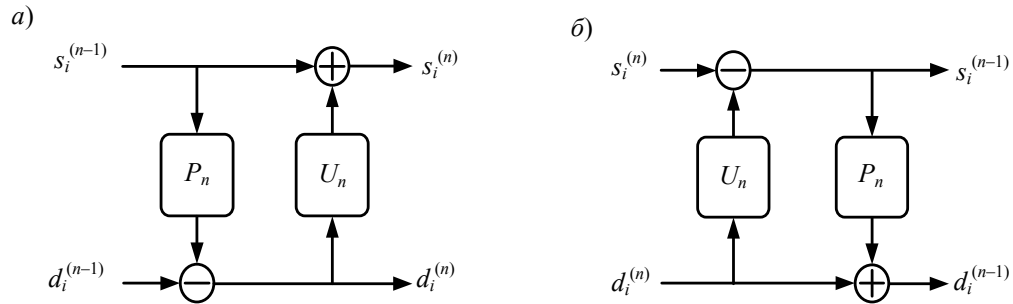


Рис. 2

Для практической реализации хорошо зарекомендовавших себя биортогональных вейвлет-фильтров требуется осуществить переход к аналогичной вейвлетам полифазной структуре лифтинга. Формальная схема перехода представлена на рис. 3, где использованы следующие обозначения: $X(z)$ — входной сигнал; z^{-1} — смещение входной последовательности на один отсчет в терминах z -преобразования; $Q(z)$ — полифазная матрица вейвлет-преобразования; $\downarrow 2$ — оператор децимации; $y_L(z)$ и $y_H(z)$ — низкочастотные и высокочастотные коэффициенты вейвлет-преобразования; $P(z)$ и $U(z)$ — операторы предсказания и обновления; K — коэффициент нормирования.

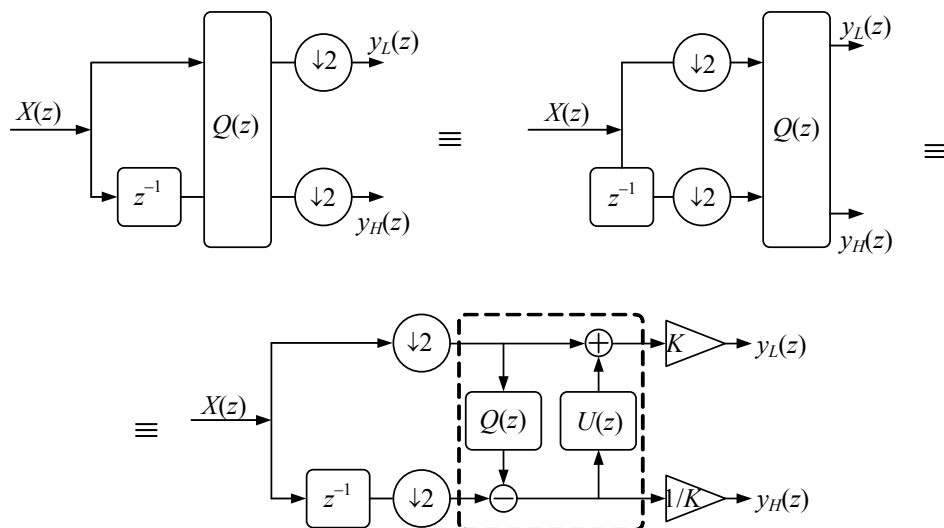


Рис. 3

В работах [3, 4] доказано, что любая полифазная матрица вейвлетного преобразования может быть факторизована произведением верхних и нижних треугольных 2×2 -матриц и диагональной матрицы коэффициентов нормирования:

$$Q(z) = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \prod_q \left\{ \begin{bmatrix} 1 & c_q(z) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ t_q(z) & 1 \end{bmatrix} \right\},$$

где $c_q(z)$ и $t_q(z)$ — полиномы Лорана, K_1 и K_2 — коэффициенты нормирования.

Вычисление полиномов $c(z)$ и $t(z)$ основывается на алгоритме Евклида по поиску наибольшего общего делителя для полиномов Лорана, которые представляются выражениями следующего вида:

$$|j(z)| = \sum_{k=a}^b j[k]z^{-k},$$

где a, b — целые числа, $a \leq b$; $j[k]$ — фильтр.

Операция деления для полиномов Лорана с помощью алгоритма Евклида выполняется следующим образом. Пусть $a(z)$ и $b(z)$ — полиномы Лорана, удовлетворяющие условию $|a(z)| \geq |b(z)|$. Тогда всегда существуют полином $q(z)$ степени $|q(z)| = |a(z)| - |b(z)|$ и полином $r(z)$ степени $|r(z)| < |b(z)|$, такие что

$$|a(z)| = |q(z)| \cdot |b(z)| + |r(z)|.$$

Когда в результате деления $b(z)$ становится одночленом, это означает, что остаток $|r(z)| = 0$ и деление выполнено точно.

Существующая технология конструирования лифтинг-схем реализуется следующим образом:

— осуществляется переход от классических банков вейвлет-фильтров к полифазным структурам вейвлет-преобразования;

— полифазные фильтры описываются с помощью полиномов Лорана с использованием алгоритма Евклида.

При выборе фильтра для лифтинг-преобразования в предлагаемом методе сжатия неподвижных изображений используется определенная последовательность операций:

1) выбираются несколько биортогональных фильтров и вычисляются варианты их факторизации;

2) каждая группа решений экспериментально исследуется с использованием набора специализированных тестовых изображений; по результатам тестирования отбираются лучшие решения;

3) компонуется набор фильтров лифтинг-преобразования;

4) выбор фильтров лифтинг-преобразования из созданного набора осуществляется с учетом необходимости обеспечения наилучшего выполнения задачи сжатия входного изображения.

Фрагмент входного изображения кодируется с использованием всех фильтров лифтинг-преобразования из имеющегося набора. После декодирования все восстановленные фрагменты изображения сопоставляются с исходным фрагментом путем расчета значений объективного показателя качества PSNR. Далее выбирается наибольшее значение PSNR, и соответствующий ему код передается по каналу связи. Параметры фильтра отмечаются в служебной информации для каждого пакета выходного битового потока. Коэффициенты (h, g) биортогональных фильтров анализа/синтеза, используемые для преобразования, приведены в табл. 2.

При наземной обработке изображений важным фактором является их высокое исходное качество. Поэтому обеспечение минимальных потерь при кодировании — одно из существенных требований к методам сжатия данных аэрокосмической съемки. Типичное изображение земной поверхности имеет следующие характеристики: размер $30\,000 \times 30\,000$ пкс, глубина кодирования 8 бит, объем файла приблизительно 1 Гбайт.

Таблица 2

Фильтр 5/3		Фильтр 7/5		Фильтр 9/7	
$h_{-2} = -0,17678$	$g_{-1} = 0,35355$	$h_{-3} = -0,01071429$	$g_{-2} = -0,05$	$h_{-4} = 0,026749$	$g_{-3} = -0,045636$
$h_{-1} = 0,35355$	$g_0 = 0,70711$	$h_{-2} = -0,05357143$	$g_{-1} = 0,25$	$h_{-3} = -0,016864$	$g_{-2} = -0,028772$
$h_0 = 1,06066$	$g_1 = 0,35355$	$h_{-1} = 0,26071424$	$g_0 = 0,6$	$h_{-2} = -0,078223$	$g_{-1} = 0,295636$
$h_1 = 0,35355$		$h_0 = 0,60714286$	$g_1 = 0,25$	$h_{-1} = 0,266864$	$g_0 = 0,537543$
$h_2 = -0,17678$		$h_1 = 0,26071424$	$g_2 = -0,05$	$h_0 = 0,602944$	$g_1 = 0,295636$
		$h_2 = -0,05357143$		$h_1 = 0,266864$	$g_2 = -0,028772$
		$h_3 = -0,01071424$		$h_2 = -0,078223$	$g_3 = 0,045636$
				$h_3 = -0,016864$	
				$h_4 = 0,026749$	

В качестве примера, демонстрирующего эффективность рассмотренного метода, на рис. 4 приведены исходное (а) и восстановленное после сжатия в 20 раз (б) изображения. Качество сжатия изображения по показателю PSNR составляет: для фильтра 5/3 — 27,4 дБ, для фильтра 7/5 — 30,6 дБ, для фильтра 9/7 — 33,0 дБ.

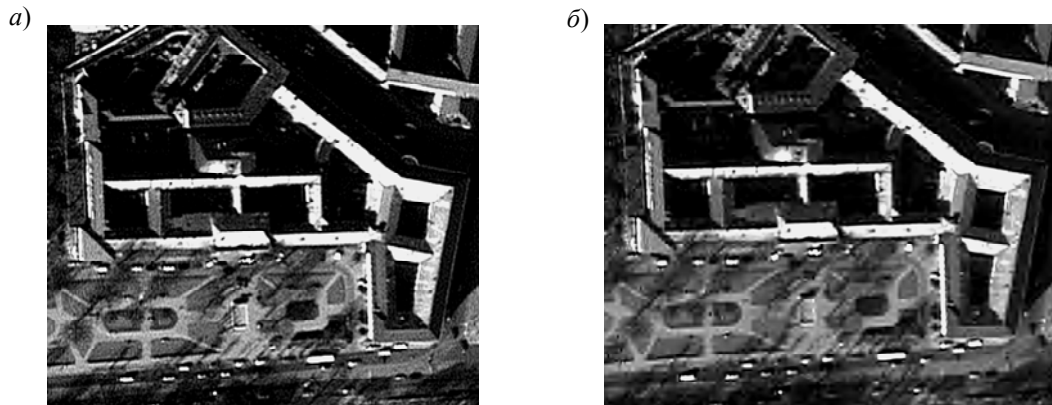


Рис. 4

Предпочтительным в рассматриваемом примере является фильтр 9/7, так как при одинаковой степени сжатия качество восстановленного изображения по показателю PSNR для данного фильтра выше.

Проведенные исследования показали, что путем надлежащего выбора фильтров лифтинг-преобразования и использования критерия объективной оценки качества изображений PSNR можно обеспечить гарантированный режим сжатия изображений с высоким качеством. Результаты экспериментов подтверждают перспективность внедрения методов адаптивного сжатия изображений в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, выполняемых в целях развития российской системы дистанционного зондирования Земли из космоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 384 с.
2. Дудин Е. А., Тутков Б. В., Алтухов А. И. Технология компрессии изображений больших размеров // Научно-технические ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2009. № 1. С. 46—50.
3. Daubechies I., Sweldens W. Factoring wavelets transforms into lifting steps // J. Fourier Anal. Appl. 1998. Vol. 4, N 3. P. 247—269.
4. Sweldens W. The lifting scheme: A custom-design construction on biorthogonal wavelets // Applied Computer Harmonic Analysis. 1996. Vol. 3, N 2. P. 186—200.

Сведения об авторах

- Андрей Николаевич Григорьев** — канд. техн. наук, докторант; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра оптико-электронных средств; E-mail: Grig-AN@ya.ru
- Евгений Александрович Дудин** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра оптико-электронных средств; E-mail: DudinEA@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных средств

Поступила в редакцию
30.06.14 г.

Ссылка для цитирования: Григорьев А. Н., Дудин Е. А. Метод адаптивного сжатия спутниковых изображений земной поверхности // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 179—184.

METHOD FOR ADAPTIVE COMPRESSION OF SATELLITE IMAGES OF EARTH SURFACE**A. N. Grigoriev, E. A. Dudin**

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, Saint Petersburg, Russia
E-mail: DudinEA@mail.ru

A method of adaptive compression of satellite images is proposed. The method uses a bank of filters of direct / inverse wavelet transform and decisions providing the required quality of the reconstructed images with a high compression ratio.

Keywords: remote sensing of the Earth, satellite image compression, wavelet transformation, lifting scheme.

Data on authors

- Andrey N. Grigoriev** — PhD, Doctoral Cand.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Optical-Electronic Means; E-mail: Grig-AN@ya.ru
- Evgeny A. Dudin** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Optical-Electronic Means; E-mail: DudinEA@mail.com

Reference for citation: Grigoriev A. N., Dudin E. A. Method for adaptive compression of satellite images of Earth surface // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 179—184 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-179-184

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ АППАРАТА ОБОБЩЕННЫХ МАТРИЧНЫХ ЧИСЕЛ

С. А. БАГРЕЦОВ, Э. В. МИЩЕНКО

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ed.84@mail.ru

Для определения кратчайшего пути в графе состояния системы предлагается использовать аппарат обобщенных матричных чисел и вводится понятие модифицированной детерминантной функции матричного числа.

Ключевые слова: кратчайший путь, граф состояния, выбор оптимальных методов производства.

Неотъемлемой частью современных промышленных предприятий являются гибкие производственные системы, эффективность которых в значительной степени определяется процессом управления их функционированием.

К таким системам предъявляются особо жесткие требования по надежности, времени и стоимости производства. Для удовлетворения указанных требований, в случае сбоя технологического процесса, система должна обладать свойствами реконфигурации и восстановления, что обеспечивается за счет структурной или функциональной избыточности. На определение необходимой конфигурации системы, в зависимости от уровня ее автоматизации, требуется от единиц минут до нескольких часов [1, 2].

Как правило, решение подобных задач связано с необходимостью минимизации временных, стоимостных и других затрат. Этим обуславливается возможность формализации представления системы в виде некоторой ориентированной сети связей (графа состояний) $G(X, Y)$, где $X = \overline{1, N}$ — множество вершин сети, соответствующих отдельным этапам или операциям производственного процесса; $Y \subseteq XX$ — множество дуг сети, соответствующих возможным технологическим связям между отдельными операциями, т.е. вершинами сети. При этом каждая дуга (i, j) , $i, j \in X$, сети из множества Y имеет длину α_{ij} и интерпретируется как временные, стоимостные и другие затраты. В этом случае задача оптимизации технологического процесса сводится к определению такого состава технических средств производства, который позволит обеспечить его оптимизацию по системе выбранных критериев с учетом заданных ограничений. По своему содержанию такая задача сводится к выбору кратчайшего пути S_{1N} между вершиной $X=1$, соответствующей началу производственного цикла, и вершиной $X=N$, определяющей его окончание.

Среди методов решения подобных задач наиболее эффективными являются методы, основная процедура реализации которых заключается в определении минимального веса узлов сети посредством рекуррентных преобразований типа

$$Z_{1j} = \min_{j \neq i} \{Z_i + \alpha_{ij}\}, j = \overline{2, N}, \quad (1)$$

где Z_{1j} — длина кратчайшего пути из вершины 1 в вершину j ; $Z_1 = 0$; $Z_i \in [0, +\infty)$; $i = \overline{1, N}$.

Увеличение количества этапов (операций) производства влечет за собой повышение трудоемкости и времени решения задачи. Влияние данного фактора может быть снижено за счет учета рациональной структуры сети и системы ограничений, обеспечивающих исключение из рассмотрения альтернативных вариантов путей (не удовлетворяющих условиям поиска)

на ранних стадиях их формирования. Сокращение числа рассматриваемых вариантов возможно в рамках теоретико-множественного подхода к представлению сети.

Одним из способов, который позволяет реализовать теоретико-множественный подход к решению задачи и существенно упростить процедуру определения структуры сети, является аппарат обобщенных матричных чисел [3, 4].

Представим, согласно работе [1], исходную сеть $G(X, Y)$ обобщенным матричным числом α , каждый элемент α_{ij} которого отражает взаимосвязь вершин i и j , $i, j \in X$. Обобщенное матричное число α является теоретико-множественной моделью анализируемого процесса, условно представляемого сетью $G(X, Y)$. Каждый элемент α_{ij} матричного числа α изоморфен соответствующему элементу матрицы весов

$$A = \|\alpha_{ij}\|; \quad i, j \in X, i, j = \overline{1, N}.$$

Для определения суммы весовых коэффициентов контурных чисел β сети $G(X, Y)$ в работе [1] рассматривается детерминантная функция матричного числа α , равная

$$\det \left[\alpha = \sum_{\vartheta \in C} (-1)^{v_{\vartheta}} \prod_{g \in R} \det e_{\vartheta g} \right],$$

где C, R — число столбцов и строк контурного числа сети; v_{ϑ} — число контуров, образованных ϑ -м столбцом контурного числа сети; $\det e_{\vartheta g} = \alpha_{gj}$ — элемент матрицы весов A , изоморфный соответствующему элементу $e_{\vartheta g}$ ϑ -го столбца контурного числа; контурное число $\beta = \|e_{\vartheta g}\|$, $\vartheta \in C, g = \overline{1, N}$.

Условие построения контурного числа β по заданному матричному числу α сети $G(X, Y)$ определяется выражением

$$\beta = [\alpha]_{\text{mod } 2}, \quad (2)$$

означающим, что контурное число сети равно декартовому произведению элементов отдельных строк матричного числа α .

Для дальнейшего рассмотрения решения задачи введем понятие модифицированной детерминантной функции ($\det^*(\cdot)$), под которой будем понимать детерминантную функцию, в которой операции сложения и умножения заменены соответствующими их модификациями.

Заменим, согласно терминологии Бержа [5], операции суммирования и произведения операциями обобщенного произведения (\prod^*) и модифицированного сложения (\sum^*), которыми на множестве действительных чисел определяются операции вида

$$\prod_j^* c_j = \sum_j c_j, \quad \sum_j^* c_j = \min \{c_j\}.$$

С учетом выражения (2) модифицированная детерминантная функция по модулю 2 обобщенного матричного числа α будет равна

$$\det^* [\alpha]_{\text{mod } 2} = \sum_{\vartheta \in C} \prod_{g \in R}^* \det e_{\vartheta g}.$$

Тогда справедливым оказывается следующее утверждение.

Утверждение. Модифицированная детерминантная функция по модулю 2 производной от обобщенного матричного числа α по индексам начальной ($i=1$) и конечной ($i=N$) вершин сети $G(X, Y)$ определяет кратчайший путь из вершины $i=1$ в вершину $i=N$.

Доказательство. Из приведенного в работе [1] определения следует, что производной от обобщенного матричного числа α по индексам i и j является такое матричное число α' , в котором удалены строки с номером i и элементы с номером j , т.е.

$$\alpha' = \frac{\partial \alpha}{\partial_1 \partial_N} = \left((\alpha \setminus \alpha_{1j}) \setminus \alpha_N \right). \quad (3)$$

В соответствии с выражением (1) детерминантная функция производной от матричного числа α по индексам начальной и конечной вершин определяется декартовым произведением элементов строк числа α . Из определения матричного числа α следует, что декартово произведение любых двух множеств $\{\alpha_{k,i_1}\}$ и $\{\alpha_{k+1,i_2}\}$, $i_1, i_2 = \overline{1, N}$, $i_1 \neq i_2$, позволяет определить все возможные сочетания дуг сети, соединяющих между собой вершины с координатами $\{k\} \in X$ и $\{k+1\} \in X$.

С учетом выражения (3) на основе контурного числа β' производной от матричного числа α' определяются все возможные пути, проходящие через начальную и конечную вершины сети $G(X, Y)$, включая пути S_{Π} , содержащие повторные циклы. При этом пути S_{Π} могут быть определены по наличию в структуре их описания сочетаний элементов (α_{ij}) матричного числа:

$$\{\alpha_{iq}^{\zeta}; \alpha_{q\gamma}^{\zeta}; \dots; \alpha_{ji}^{\zeta}\} \quad \forall i = \overline{2, (N-1)}, \quad \zeta \in S_{\Pi}.$$

В этом случае, используя выражение (2), можно выделить из множества всех возможных путей путь (j), имеющий минимальный вес. Таким образом, при условии

$$\prod_{g \in R}^* \det e_{9g} = \begin{cases} 0, \text{ если } (\alpha_{iq}^{\zeta}; \alpha_{q\gamma}^{\zeta}; \dots; \alpha_{ji}^{\zeta}) \in \zeta \vee \prod_{g \in R}^* \det e_{9g} \geq Z_9 \vee \\ \vee Z_{gl} > Z_{9, \max} \quad \forall g \in R \vee K = 1; \\ \sum_{g \in R} \alpha_{ig} \text{ — в противном случае,} \end{cases}$$

где $K = \begin{cases} 1, \text{ если } i = j \quad \forall \alpha_{ij} \in e_{9g}; \\ 0 \text{ в противном случае;} \end{cases}$ $Z_9 = \min \{Z_9, Z_{1j}\}$ — начальное эвристическое решение задачи;

Z_{gl} — вес g -го узла сети, входящего в путь l , утверждение доказано.

В терминах обобщенных матричных чисел решение задачи определения кратчайшего пути между вершинами сети $G(X, Y)$, равными $i=1$ и $j=N$, может быть записано как

$$Z = \det^* [\alpha_{1,N}]_{\text{mod } 2}.$$

Таким образом, предлагаемая методика определения кратчайшего пути в графе позволяет учесть начальное эвристическое решение задачи в ходе выполнения алгоритма и исключить из рассмотрения пути, содержащие циклы (повторяющиеся вершины).

Рассмотрим пример реализации методики в ходе технологического процесса производства деталей, включающего три комплексные операции обработки:

1) с использованием универсального центра обработки (УЦО) — вершина 3, станка с числовым программным управлением (СЧПУ) — вершина 2 — или технологического комплекса с ручным управлением (РУ) — вершина 4;

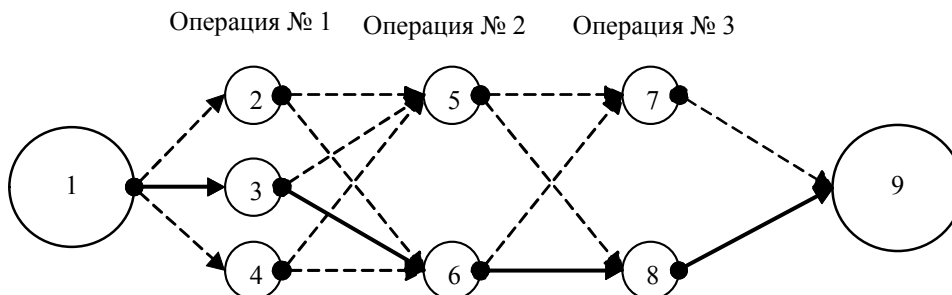
2) с использованием универсального центра обработки при условии его переоснащения инструментальными средствами — вершина 5 — или отдельного станочного комплекса РУ — вершина 6;

3) с использованием технологического оборудования с ручным управлением — вершина 7 — или специализированного станочного оборудования с программным управлением (СОПУ) — вершина 8.

В качестве основного показателя эффективности технологического процесса примем время обработки (T), а в качестве заданных ограничений — затраты на применяемые средства обработки (Θ , в относительных единицах). Результаты предварительного анализа параметров T и Θ приведены в таблице. Общее ограничение по затратам на указанный комплекс операций задано равным $Q = 22$. Начальное эвристическое решение задачи $Z_0 = (\text{путь } \alpha_{14}, \alpha_{45}, \alpha_{58}, \alpha_{89}) Z = 22$.

Номер операции	Способы реализации операции (вершина графа)	T , мин	Θ , о.е.
1	УЦО (3)	2	0,9
	СЧПУ (2)	3	0,8
	РУ (4)	6	0,5
2	УЦО(5)	3	0,95
	РУ(6)	2	0,8
3	РУ (7)	7	0,4
	СОПУ (8)	3	0,6

В общем виде задача оптимизации технологического процесса обработки детали аналогична задаче булевого программирования — поиска минимального пути на графе (см. рисунок) при ограничениях $Q = 22$ и $Z = 22$.



В результате анализа модифицированной детерминантной функции $\det^*[\alpha_{19}]$ с учетом матричного числа α , контурного числа β и матрицы ограничений Θ сформировано 13 возможных путей, однако оптимальный путь один — $\alpha_{13}, \alpha_{36}, \alpha_{68}, \alpha_{89}$ (на графе показан сплошными линиями). Оптимальный путь соответствует значениям бинарных переменных, определяющим оптимальную технологию производства продукции при заданной системе ограничений. Учет этих данных во многом позволяет сократить время расчета оптимального пути реализации технологического процесса. При этом уменьшение количества вычислений и соответственно выигрыш во времени существенно зависят от структуры сети, критичности начального эвристического решения и реализации прогнозируемых вариантов пути на промежуточных этапах его формирования. Именно учет этой системы факторов определяет эффективность предложенной методики по сравнению с существующими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Выжигин А. Ю.* Гибкие производственные системы. М.: Машиностроение, 2009.
2. *Медведев В. А., Вороненко В. П., Брюханов В. Н.* Технологические основы гибких производственных систем: Учебник для вузов. М.: Высш. школа, 2000.
3. Анализ надежности сложных систем методом обобщенных матричных чисел / *А. И. Губинский, В. Г. Пантелей, Л. В. Разубаева* // Теория и практика надежности вычислительных и радиотехнических устройств. Вильнюс: Мокслас, 1975. С. 42—48.

4. Берж К. Теория графов и ее применения. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.

5. Губинский А. И., Евграфов В. Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Л.: Судостроение, 1977.

Сведения об авторах

Сергей Алексеевич Багрецов

— д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра специальных радиотехнических систем

Эдуард Владимирович Мищенко

— ВКА им. А. Ф. Можайского, учебно-методический отдел, начальник отделения; E-mail: ed.84@mail.ru

Рекомендована кафедрой
специальных радиотехнических
систем

Поступила в редакцию
17.09.14 г.

Ссылка для цитирования: Багрецов С. А., Мищенко Э. В. Модель управления производственной системой на основе аппарата обобщенных матричных чисел // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 185—189.

**THEORETICAL MODEL OF CONTROL OVER PRODUCTION SYSTEM ON THE BASE
OF THE GENERALIZED MATRIX VALUE CONCEPT**

S. A. Bagrecov, E. V. Mishchenko

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, Saint Petersburg, Russia

E-mail: ed.84@mail.ru

The apparatus of generalized matrix properties is applied to determine the shortest path in the graph. The concept of modified determinant function of matrix number is introduced.

Keywords: shortest path, state graph, optimal production method choice.

Data on authors

Sergey A. Bagrecov

— Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Special Radio Engineering Systems

Eduard V. Mishchenko

— A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Training and Methodology Division; Head of the Department; E-mail: ed.84@mail.ru

Reference for citation: Bagrecov S. A., Mishchenko E. V. Theoretical model of control over production system on the base of the generalized matrix value concept // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 185—189 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-185-189

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 629.783:521.3
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-190-196

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. Д. ГОЛЯКОВ, И. В. ФОМИНОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: i.v.fominov@gmail.com*

Рассматривается метод оценивания точности системы автономной навигации космического аппарата, заключающийся в определении аналитическим путем ковариационных матриц погрешностей навигации, полученных на основе измерений, производимых адаптивным бортовым информационно-измерительным комплексом при наличии возмущающих факторов космического пространства.

Ключевые слова: адаптивный бортовой информационно-измерительный комплекс, система автономной навигации космического аппарата, оценка точности навигации, возмущающие факторы космического пространства.

Исследование процессов и принципов функционирования бортовых систем управления космических аппаратов (КА) связано с определением целесообразности использования новых технических решений по созданию перспективных систем автономной навигации. В ходе этих исследований решается комплекс задач, одной из которых является анализ потенциальной (предельно достижимой) точности определения параметров движения центра масс КА при выбранных составах датчиков первичной навигационной информации (далее — датчики).

Для проведения аналитических исследований точности систем автономной навигации (САН) КА используются детерминированные и стохастические методы, разработанные в рамках научной школы под руководством проф. Л. Ф. Порфирьева и представленные в монографии [1]. При этом объективная информация о характеристиках точности исследуемой САН КА формируется с помощью стохастического метода начального оценивания, который получил развитие в работах [2—5].

В результате применения этого метода можно аналитическим путем найти ковариационную матрицу погрешностей навигации КА, т.е. матрицу $K(\mathbf{Q}(t_0))$, где $\mathbf{Q}(t_0)$ — вектор параметров движения центра масс КА в момент времени t_0 , который соответствует началу мерного интервала навигационного режима:

$$\mathbf{Q}(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0) \ Z(t_0) \ \dot{X}(t_0) \ \dot{Y}(t_0) \ \dot{Z}(t_0)]^T, \quad (1)$$

где $X(t_0), Y(t_0), Z(t_0)$ и $\dot{X}(t_0), \dot{Y}(t_0), \dot{Z}(t_0)$ — составляющие радиус-вектора и вектора скорости КА в прямоугольной системе координат XYZ .

Искомая матрица $K(\mathbf{Q}(t_0))$ определяется из выражения [1]

$$K(\mathbf{Q}(t_0)) = \left[\frac{N}{\tau} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \int_{t_0}^{t_0+\tau} W_i^T(t, t_0) W_i(t, t_0) dt \right]^{-1}, \quad (2)$$

где N — количество сеансов измерений при навигационном режиме; τ — продолжительность мерного интервала навигационного режима; n — количество датчиков, используемых в каждом навигационном сеансе; σ_i^2 — дисперсия погрешностей измерений, производимых i -м датчиком; $W_i(t, t_0)$ — матрица, определяемая в результате перемножения градиентной матрицы i -го первичного навигационного параметра, измеряемого соответствующим датчиком в ходе каждого навигационного сеанса, и матрицы баллистических производных [1, 3, 4].

В настоящее время в теории аналитического оценивания точности САН КА полагается, что при навигационном режиме функционирования КА дисперсии погрешностей имеют постоянные значения, т.е. $\sigma_i^2 = \text{const}$, $i = \overline{1, n}$. В соответствии с этим допущением в работах [1—5] получены ковариационные матрицы.

Однако анализ результатов функционирования бортовых измерительных приборов САН КА показал, что во время летной эксплуатации существуют риски появления возмущающих факторов космического пространства [6], дестабилизирующих процесс навигационных измерений и, как следствие, вызывающих снижение точности навигации. Причем с увеличением срока активного существования КА эти риски возрастают.

Эффективный способ „парирования“ таких рисков при эксплуатации КА — применение адаптивного бортового информационно-измерительного комплекса (АБИИК), обобщенная структура которого приведена в работе [6]. При появлении возмущающих факторов такой комплекс способен обеспечить выполнение целевых задач КА, не прерывая процесса навигационных измерений.

Таким образом, дальнейшее развитие теории аналитического оценивания точности САН КА связано с использованием АБИИК. Это обусловлено тем, что при формировании аналитических выражений ковариационных матриц дисперсии погрешностей σ_i^2 не являются постоянными величинами, а представляют собой функции, зависящие от вида и уровня воздействия возмущающего фактора.

Предположим, что при навигационном режиме в моменты времени t_j на датчики последовательно воздействуют m факторов Φ_j . При этом зависимости дисперсий погрешностей от возмущающего фактора являются известными функциями, т.е. $\sigma_{ij}^2 = \sigma_i^2(\Phi_j)$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{0, m}$, $i \neq j$. Будем также полагать, что в начальный момент времени t_0 возмущающее воздействие отсутствует, т.е. для i -го датчика дисперсия $\sigma_{i0}^2 = \sigma_i^2(\Phi_0) = \text{const}$, $i = \overline{1, n}$.

Тогда для определения ковариационной матрицы следует использовать выражение

$$K_{\Phi}(\mathbf{Q}(t_0)) = \left[\sum_{j=0}^m \frac{N_j}{\tau_j} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2(\Phi_j)} \int_{t_j}^{t_j+\tau_j} W_i^T(t, t_0) W_i(t, t_0) dt \right]^{-1}, \quad (3)$$

где N_j и τ_j — количество и продолжительность сеансов навигационных измерений, в течение которых возмущающие факторы Φ_j , $j = \overline{0, m}$, воздействуют на навигационные датчики.

Параметры N_j и τ_j связаны с параметрами N и τ (количеством сеансов измерений при навигационном режиме и продолжительностью его мерного интервала) очевидными равенствами $N = \sum_{j=0}^m N_j$ и $\tau = \sum_{j=0}^m \tau_j$.

Таким образом, матрица (3) будет представлять собой функцию параметров возмущающего фактора: $K_{\Phi}(\mathbf{Q}(t_0)) = f_{\Phi}(m, n, N_j, \tau_j, W(t, t_0), \sigma_i^2(\Phi_j), i = \overline{1, n}, j = \overline{0, m})$.

Ковариационная матрица $K_{\Phi}(\mathbf{Q}(t_0))$ характеризует точность функционирования САН КА в условиях наличия возмущающих факторов; при этом ее диагональные элементы представляют собой аналитические выражения, с помощью которых рассчитываются дисперсии оценок вектора $\mathbf{Q}(t_0)$ с учетом адаптации бортовой аппаратуры КА к возмущающим факторам.

При обнаружении возмущающего фактора посредством блока адаптации комплекса осуществляется перестроение измерительной аппаратуры в целях обеспечения непрерывности навигационного режима. В частности, в момент t_1 по команде блока адаптации отключается один состав датчиков и включается другой. Это приводит к тому, что значение дисперсии измерений первичного навигационного параметра скачкообразно изменяется от σ_1^2 до σ_2^2 .

Как правило, указанное перестроение может привести к некоторому снижению точности измерения первичного навигационного параметра при адаптации аппаратуры к возмущающим воздействиям. Для определения этого факта введем коэффициент погрешностей измерений $k = \sigma_1 / \sigma_2$. Очевидно, что $k \in (0, 1]$; если $k \approx 1$, это свидетельствует о достаточно высоком качестве адаптации (перестроения) измерительной аппаратуры и, в том числе, ее высокой точности; при идеальном же замещении равноточных датчиков $k = 1$. При технической невозможности провести перестроение или при возникновении метрологического отказа замещающего состава датчиков, т.е. при $\sigma_2 \gg \sigma_1$, $k \approx 0$. В связи с этим коэффициент погрешностей измерений является относительной характеристикой точности включенных датчиков, которые используются при наличии возмущающего фактора.

Для проведения сравнительного анализа результатов выполненных исследований с результатами, полученными в работе [1], примем, что опорная орбита КА является круговой. Анализ точности навигации КА будем выполнять в геоцентрической системе отсчета XYZ , оси X и Y которой находятся в плоскости орбиты КА, а ось Z совмещена с нормалью к плоскости его орбиты. Ось X совмещена с радиус-вектором КА, поэтому она называется радиальной осью, а перпендикулярная ей ось Y — трансверсальной.

В этой системе отсчета параметры движения центра масс КА, находящегося на опорной орбите в некоторый начальный момент времени t_0 , определяются вектором $\mathbf{Q}_0(t_0) = [r \ 0 \ 0 \ V \ 0 \ 0]^T$, где модуль скорости V полета КА связан с радиусом r его орбиты известным соотношением [1]

$$V = \lambda r = \sqrt{\mu/r},$$

где λ — угловая орбитальная скорость движения КА; $\mu = 3,98\ 602 \cdot 10^5 \text{ км}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ — гравитационный параметр Земли.

Предположим, что навигационная звезда находится в плоскости орбиты КА. В этом случае элементы градиентной матрицы, содержащие частные производные от угла β (образованного направлением на звезду и условный центр Земли — угол „звезда—вертикаль“) по параметрам движения КА относительно плоскости орбиты, равны нулю. Поэтому найдем ковариационную матрицу погрешностей навигации для вектора $\mathbf{Q}_1(t_0) = [X(t_0) \ Y(t_0) \ \dot{X}(t_0) \ \dot{Y}(t_0)]^T$.

С учетом принятых допущений искомая ковариационная матрица принимает вид

$$K_{\Phi}^{\beta}(\mathbf{Q}_1(t_0)) = \frac{r^2 \sigma_1^2}{N} \begin{bmatrix} \tilde{K}_x^{\beta}(k) & \tilde{K}_{xy}^{\beta}(k) & \tilde{K}_{xx}^{\beta}(k)\lambda & \tilde{K}_{xy}^{\beta}(k)\lambda \\ & \tilde{K}_y^{\beta}(k) & \tilde{K}_{yx}^{\beta}(k)\lambda & \tilde{K}_{yy}^{\beta}(k)\lambda \\ & & \tilde{K}_{\dot{x}}^{\beta}(k)\lambda^2 & \tilde{K}_{\dot{y}}^{\beta}(k)\lambda^2 \\ & & & \tilde{K}_{\dot{y}}^{\beta}(k)\lambda^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где коэффициенты дисперсий и коэффициенты ковариаций погрешностей оценивания вектора $\mathbf{Q}_1(t_0)$ определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_x^{\beta}(k) &= \frac{1}{3\Delta_{\beta}(k)} [(3\pi^4 + 32\pi^2 - 544)(k^6 + 1) + k(45\pi^4 + 480\pi^2 + 544)(k^2 + 1)]; \\ \tilde{K}_y^{\beta}(k) &= \frac{4}{\Delta_{\beta}(k)} [(15\pi^4 - 44\pi^2 - 624)k^6 + (45\pi^4 - 100\pi^2 + 1392)k^4 + \\ &\quad + (33\pi^4 - 100\pi^2 - 912)k^2 + 3\pi^4 - 44\pi^2 + 144]; \\ \tilde{K}_{\dot{x}}^{\beta}(k) &= \frac{1}{\Delta_{\beta}(k)} [(57\pi^4 - 296\pi^2 - 1344)k^6 + (135\pi^4 - 184\pi^2 - 2880)k^4 + \\ &\quad + (87\pi^4 + 8\pi^2 - 1728)k^2 + 9\pi^4 - 104\pi^2 + 192]; \\ \tilde{K}_y^{\beta}(k) &= \frac{1}{3\Delta_{\beta}(k)} [(3\pi^4 + 8\pi^2 - 352)(k^6 + 1) + k^2(45\pi^4 + 216\pi^2 + 352)(k^2 + 1)]; \\ \tilde{K}_{xy}^{\beta}(k) &= \frac{4\pi}{\Delta_{\beta}(k)} [(5\pi^4 - 32\pi^2 - 32)k^6 + (37\pi^4 - 128\pi^2 + 96)k^4 + \\ &\quad + (35\pi^4 - 64\pi^2 - 96)k^2 + 3\pi^4 - 32\pi^2 + 32]; \\ \tilde{K}_{xx}^{\beta}(k) &= -\frac{4\pi\lambda}{\Delta_{\beta}(k)} [(5\pi^4 - 40\pi^2 + 32)k^6 + (37\pi^4 + 72\pi^2 - 96)k^4 + \\ &\quad + (35\pi^4 - 8\pi^2 + 96)k^2 + 3\pi^4 - 24\pi^2 - 32]; \\ \tilde{K}_{\dot{y}}^{\beta}(k) &= -\frac{\pi^2}{3\Delta_{\beta}(k)} [(3\pi^4 + 16\pi^2 - 416)(k^6 + 1) + k^2(45\pi^4 + 336\pi^2 + 416)(k^2 + 1)]; \\ \tilde{K}_{yx}^{\beta}(k) &= -\frac{2\pi^2}{\Delta_{\beta}(k)} [(29\pi^4 - 116\pi^2 - 960)k^6 + (75\pi^4 - 124\pi^2 + 2112)k^4 + \\ &\quad + (51\pi^4 - 76\pi^2 - 1344)k^2 + 5\pi^4 - 68\pi^2 + 192]; \\ \tilde{K}_{yy}^{\beta}(k) &= -\frac{8\pi}{\Delta_{\beta}(k)} [(\pi^4 - 8\pi^2 + 16)k^6 + (15\pi^4 + 56\pi^2 - 48)k^4 + \\ &\quad + (15\pi^4 - 40\pi^2 + 48)k^2 + \pi^4 - 8\pi^2 - 16]; \\ \tilde{K}_{\dot{y}}^{\beta}(k) &= \frac{8\pi}{\Delta_{\beta}(k)} [(\pi^4 - 10\pi^2 + 32)k^6 + (15\pi^4 + 30\pi^2 - 96)k^4 + \\ &\quad + (15\pi^4 - 14\pi^2 + 96)k^2 + \pi^4 - 6\pi^2 - 32]; \end{aligned}$$

$$\Delta_{\beta}(k) = \frac{2}{\pi^2} [(\pi^6 - 8\pi^4 - 96\pi^2 + 768)(k^8 + 1) + 16k^2(\pi^6 - 6\pi^4 - 192)(k^4 + 1) + 2k^4(15\pi^6 - 88\pi^4 + 96\pi^2 + 2304)].$$

С помощью выражения (4) найдем СКО погрешностей оценок параметров движения центра масс КА в плоскости его орбиты:

$$\delta_x(k) = \tilde{k}_x^{\beta}(k) \frac{r \sigma_1}{\sqrt{N}}; \quad \delta_y(k) = \tilde{k}_y^{\beta}(k) \frac{r \sigma_1}{\sqrt{N}}; \quad \delta_{\dot{x}}(k) = \tilde{k}_{\dot{x}}^{\beta}(k) \frac{V \sigma_1}{\sqrt{N}}; \quad \delta_{\dot{y}}(k) = \tilde{k}_{\dot{y}}^{\beta}(k) \frac{V \sigma_1}{\sqrt{N}}, \quad (5)$$

где $\tilde{k}_q^{\beta}(k)$ — коэффициент погрешностей навигации для q -го элемента вектора $\mathbf{Q}_1(t_0)$, который связан с коэффициентом дисперсий $\tilde{K}_q^{\beta}(k)$ равенством

$$\tilde{k}_q^{\beta}(k) = \sqrt{\tilde{K}_q^{\beta}(k)}.$$

Для случая когда орт навигационной звезды совпадает с нормалью (\mathbf{n}_0) к плоскости орбиты КА, элементы градиентной матрицы, содержащие частные производные от угла $\beta_{\mathbf{n}_0}$ по параметрам движения КА в плоскости орбиты, равны нулю. Тогда вектор параметров движения КА в направлении нормали к плоскости его орбиты определяется как $\mathbf{Q}_2(t_0) = [Z(t_0) \dot{Z}(t_0)]^T$.

Проведя матричное интегрирование и обращение матрицы в соответствии с выражением (3), получаем ковариационную матрицу погрешностей оценивания вектора $\mathbf{Q}_2(t_0)$:

$$K_{\Phi}^{\beta}(\mathbf{Q}_2(t_0)) = \frac{4r^2\sigma_1^2}{N(1+k^2)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \lambda^2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

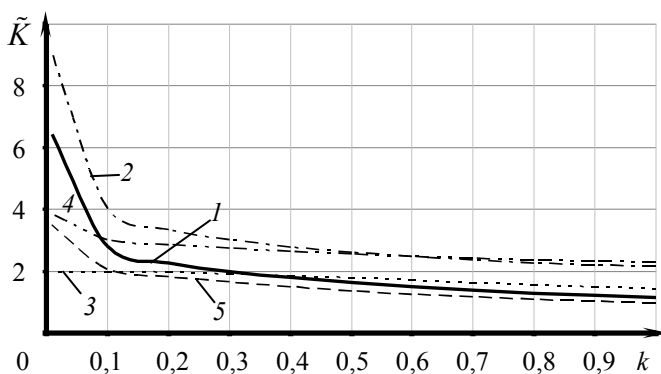
Дисперсии погрешностей оценок вектора $\mathbf{Q}_2(t_0)$ определяются как

$$\delta_z^2(k) = \tilde{K}_z^{\beta}(k) \frac{r^2\sigma_1^2}{N}, \quad \delta_{\dot{z}}^2(k) = \tilde{K}_{\dot{z}}^{\beta}(k) \frac{V^2\sigma_1^2}{N}, \quad (7)$$

где коэффициенты дисперсий оценок параметров бокового движения КА определяются из соотношения

$$\tilde{K}_z^{\beta}(k) = \tilde{K}_{\dot{z}}^{\beta}(k) = 4 / (1 + k^2).$$

Сравнительный анализ выражений (4)—(7) с результатами исследований, приведенными в работе [1, с. 133], показывает их полное совпадение при отсутствии возмущающего фактора, способного изменить СКО погрешностей навигационных измерений, т.е. при выполнении условия $k = 1$.



Результаты расчета коэффициентов погрешностей оценок вектора $\mathbf{Q}(t_0)$ при использовании АБИИК в зависимости от значений коэффициента погрешностей измерений угла „звезда—вертикаль“ приведены на рисунке и в таблице; на рисунке приняты следующие обозначения: 1 — радиальная координата, 2 — радиальная скорость, 3 — параметры бокового движения, 4 — трансверсальная координата, 5 — трансверсальная скорость.

Анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением коэффициента k , т.е. с увеличением СКО погрешностей замещающего состава датчиков, используемых при возникновении возмущающего фактора, точность навигации снижается. Наибольшая чувстви-

тельность коэффициентов \tilde{K} к изменению коэффициента k наблюдается в случаях, когда СКО погрешностей измерений углов „звезда—вертикаль“ различаются более чем в десять раз ($k < 0,1$). При этом существенное снижение точности оценивания происходит по радиальным координатам и скорости КА. Погрешности оценок трансверсальной координаты и радиальной составляющей скорости в диапазоне $0,1 < k < 1$ превышают погрешности оценок других составляющих вектора $Q(t_0)$.

Параметр оценивания	\tilde{K} при k										
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
$X(t_0)$	1,15	1,22	1,29	1,38	1,49	1,63	1,79	2,00	2,27	2,81	6,43
$Y(t_0)$	2,31	2,34	2,38	2,43	2,49	2,56	2,64	2,75	2,86	3,02	3,88
$\dot{X}(t_0)$	2,14	2,20	2,27	2,36	2,47	2,61	2,79	3,02	3,34	4,05	9,04
$\dot{Y}(t_0)$	0,97	1,02	1,08	1,16	1,25	1,36	1,50	1,65	1,83	2,08	3,52
$Z(t_0), \dot{Z}(t_0)$	1,41	1,49	1,56	1,64	1,71	1,79	1,86	1,92	1,96	1,99	2,00

Таким образом, для проведения исследований предельно достижимой точности систем автономной навигации с использованием адаптивного бортового информационно-измерительного комплекса может быть использован предложенный метод. С помощью этого метода, в развитие теории аналитического оценивания точности космической навигации, могут быть получены выражения для расчета искомых дисперсий и ковариационных моментов в случае появления возмущающих факторов при навигационном режиме функционирования КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порфирьев Л. Ф., Смирнов В. В., Кузнецов В. И. Аналитические оценки точности автономных методов определения орбит. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
2. Голяков А. Д. Методы аналитического оценивания точности системы автономной навигации космических аппаратов // Навигация и гидрография. 2010. № 30. С. 47—58.
3. Анишаков Г. П., Голяков А. Д., Петрищев В. Ф., Фурсов В. А. Автономная навигация космических аппаратов. Самара: Гос. науч.-производств. ракетно-космический центр „ЦСКБ-Прогресс“, 2011. 486 с.
4. Голяков А. Д. Введение в теорию взаимной астронавигации ИСЗ. СПб: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1992. 142 с.
5. Голяков А. Д. Аналитическая оценка потенциальной точности автономной астронавигации космического аппарата по орбитальным ориентирам // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 51—57.
6. Фоминов И. В. Обобщенная структура адаптивного информационно-измерительного комплекса подвижного объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 5—9.

Сведения об авторах

- Алексей Дмитриевич Голяков** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; E-mail: algol49@yandex.ru
- Иван Вячеславович Фоминов** — канд. техн. наук, докторант; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных систем управления; E-mail: i.v.fominov@gmail.com

Рекомендована кафедрой автономных систем управления

Поступила в редакцию 15.09.14 г.

Ссылка для цитирования: Голяков А. Д., Фоминов И. В. Аналитический метод оценивания точности адаптивной системы автономной навигации космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 190—196.

**ANALYTICAL METHOD FOR ESTIMATING THE ACCURACY OF ADAPTIVE SYSTEM
OF SPACECRAFT AUTONOMOUS NAVIGATION****A. D. Golyakov, I. V. Fominov***A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, Saint Petersburg, Russia**E-mail: i.v.fominov@gmail.com*

A method of estimating the accuracy of spacecraft autonomous navigation system is proposed. The method involves analytical determination of covariance matrices of navigation errors derived from adaptive on-board information-measuring complex data obtained under the effect of outer space disturbing factors.

Keywords: adaptive on-board information-measuring complex, spacecraft autonomous navigation system, estimation of navigation accuracy, outer space disturbing factors.

Data on authors

- Alexey D. Golyakov** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Autonomous Control Systems; E-mail: algo149@yandex.ru
- Ivan V. Fominov** — PhD, Doctoral Cand.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Autonomous Control System; E-mail i.v.fominov@gmail.com

Reference for citation: *Golyakov A. D., Fominov I. V.* Analytical method for estimating the accuracy of adaptive system of spacecraft autonomous navigation // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 3. P. 190—196 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-190-196

МЕТОД ВСТРОЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ АКТУАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ

С. В. БЫКОВСКИЙ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bsv.serg@gmail.com*

Представлен оригинальный метод генерации формальной модели реального функционирования системы на кристалле в процессе натуральных испытаний или эксплуатации. Метод предусматривает реализацию на базе встроенных средств системы на кристалле. По сравнению с альтернативными решениями существенно снижены требования к объему встроенной инструментальной памяти.

Ключевые слова: верификация, функциональная модель, сбой, система на кристалле, конечный автомат, структура Крипке.

Введение. При проектировании систем на кристалле (далее — система, СнК) компьютерное моделирование позволяет обнаружить и исправить порядка 53 % ошибок [1], тогда как значительная часть ошибок проявляется только при натуральных испытаниях и в процессе эксплуатации.

В связи с этим актуальной задачей является разработка встраиваемых механизмов мониторинга и верификации поведения системы, рассчитанных на долговременную автономную работу в рамках ограниченных вычислительных ресурсов систем на кристалле.

Существующие методы встроенной верификации с использованием журнала событий [2] не позволяют вести наблюдение за системой на протяжении длительного времени, что объясняется прямой зависимостью размера журнала событий от времени работы системы при ограниченном объеме встроенной памяти.

Другой метод — проверка системы с использованием мониторов утверждений (assertion-based verification) [3] — позволяет фиксировать лишь факт некорректного поведения системы, но не позволяет устанавливать последовательность событий, вызвавших ее сбой.

Для решения задачи уменьшения размера данных наблюдения с сохранением возможности анализа причин выявленных сбоев перспективным направлением является создание встроенных мониторов, способных во время функционирования системы сохранять только информацию об ее ошибочном поведении, не накапливая протоколов нормальной работы. Это возможно при описании поведения системы с помощью формальных моделей представления вычислительного процесса, таких как сети процессов, конечные автоматы, сети Петри и др. [4].

В общем виде проблема построения формальной модели на основе эмпирических данных изучается в области искусственного интеллекта при решении задачи индуктивного вывода [5]. Однако в области встроенной верификации задача индуктивного вывода не получила должного внимания.

В настоящей статье на основе формируемой методологической базы оригинального механизма встроенной верификации системы на кристалле предложен метод динамической актуализации функциональной модели системы, алгоритм работы которой описывается в виде детерминированного конечного автомата (Deterministic Finite Automaton — DFA).

Эталонная функциональная модель системы. Предлагаемый метод динамической актуализации (уточнения по факту) функциональной модели системы рассмотрим на примере верификации взаимодействия нескольких параллельных процессов в информационно-измерительной системе (ИИС). Здесь следует отметить, что функциональность рассматриваемой ИИС

не является жестко привязанной к платформе системы на кристалле, тем не менее метод динамической актуализации ориентирован на встроенные средства СнК, а именно — разработан с учетом ограничений по ресурсам памяти.

В процессе верификации осуществляется проверка соответствия реального поведения системы ожидаемому, специфицированному в виде эталонной функциональной модели (далее — эталонная модель).

Рассматриваемая ИИС состоит из трех параллельно функционирующих узлов, реализующих независимые процессы: коммуникационного узла (процесс $P1$), устройства управления (процесс $P2$) и обрабатывающего узла (процесс $P3$). Сеть процессов ИИС представлена на рис. 1. Для упрощения восприятия каналы взаимодействия с окружением ИИС не показаны.

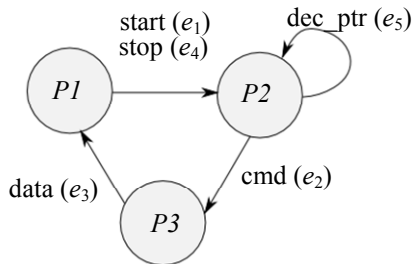


Рис. 1

Во время работы ИИС узел $P1$ принимает из внешнего окружения (персональный компьютер оператора) и ретранслирует на узел $P2$ команды “start” (событие e_1) и “stop” (событие e_4). По команде “start” устройство управления $P2$ начинает формировать последовательность команд (событие e_2) к обрабатывающему узлу $P3$, который „опрашивает“ внешние измерительные устройства (датчики), получает данные измерений, обрабатывает их и передает результаты узлу $P1$ (событие e_3). В процессе сбора данных и их обработки извне может поступить команда “stop” (событие e_4). Если команда “stop” поступила после новой команды от устройства $P2$ (событие e_2), то узел $P1$ проигнорирует данные (не будет осуществлена обработка события e_3), а следующий рабочий цикл начнется с повторного выполнения предыдущей команды (событие e_2) к узлу $P3$. Для этого $P2$ после приема команды “stop” модифицирует свой внутренний указатель команд (событие e_5).

Обозначим все множество контролируемых событий как $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$ и представим эталонную модель в виде графа DFA (рис. 2).

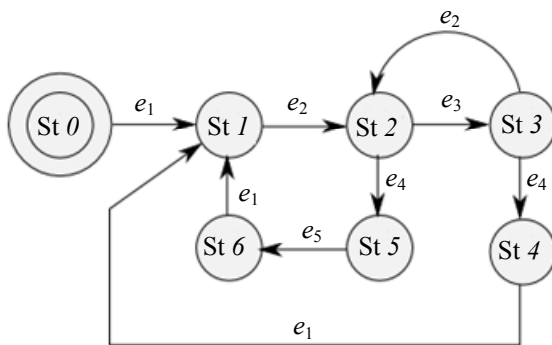


Рис. 2

Метод динамической актуализации функциональной модели. В основу метода положен процесс наблюдения за последовательностями событий (допустимыми/недопустимыми), а не за состояниями системы (запрещенными/неизвестными). Для уменьшения сложности алгоритма процесс наблюдения ограничен допустимыми парами событий, следующими друг за другом (цепочками):

$$c_k : e_i \rightarrow e_j,$$

где c_k — идентификатор цепочки из двух событий — e_i и e_j , $e_i, e_j \in E$.

Все цепочки образуют множество $C = \{c_1, \dots, c_k, \dots, c_N\}$, где N — количество цепочек, допустимых в эталонной модели. Определим три действия, связанные с проверкой цепочек.

Каждая цепочка (событий) может быть открыта для наблюдения (c_k), закрыта (c_k^+) и удалена (c_k^-). Множество открытых для наблюдения цепочек обозначим как A . При возникновении первого события цепочки из множества C цепочка открывается для наблюдения (добавляется к множеству A). При возникновении второго события в ранее открытой цепочке цепочка закрывается (c_k^+) и исключается из множества A . Если при этом в множестве A остаются цепочки, в которых совпадают первые события, то эти цепочки также удаляются из множества A (c_k^-). Это верно для состояний, из которых существуют переходы в несколько состояний (например, St 2 на рис. 2).

Формально актуализированная модель определяется конечным множеством состояний S , начальным состоянием $s_0 \in S$, множеством допустимых цепочек событий C , множеством действий $R = \{c_k, c_k^+, c_k^-\}$ над цепочками из множества C , функциями пометок состояний $L: S \rightarrow 2^{R \times C}$.

Обратимся вновь к примеру ИИС: множество допустимых цепочек C для эталонной модели ИИС представлено выражениями (см. рис. 1, 2)

$$c_1 : e_1 \rightarrow e_2, c_2 : e_2 \rightarrow e_3, c_3 : e_2 \rightarrow e_4, c_4 : e_3 \rightarrow e_2, \\ c_5 : e_3 \rightarrow e_4, c_6 : e_4 \rightarrow e_5, c_7 : e_5 \rightarrow e_1, c_8 : e_4 \rightarrow e_1.$$

Допустим, что при разработке модели не учтено наступление следующих ситуаций: 1) команда “stop” поступает сразу после команды “start”; 2) время обработки данных в узле $P3$ превысит интервал между командами, поступающими от узла $P2$ (событие e_2). Указанные ситуации не учтены в эталонной модели, однако, используя метод динамической актуализации, их можно выявить на этапе испытаний.

Актуализированная функциональная модель формируется в виде структуры Крипке [6], состояния которой размечаются фактами выполнения действий с цепочками. Таким образом, полученная структура Крипке является детерминированным конечным автоматом (DFA), как и эталонная модель.

Актуализированная функциональная модель ИИС представлена на рис. 3. На графе сплошными дугами показаны переходы, допустимые эталонной моделью (см. рис. 2), а пунктирные дуги фиксируют отклонения от эталонной модели. Для наглядности дуги помечены событиями, которые инициируют переходы между состояниями актуализированной DFA-модели.

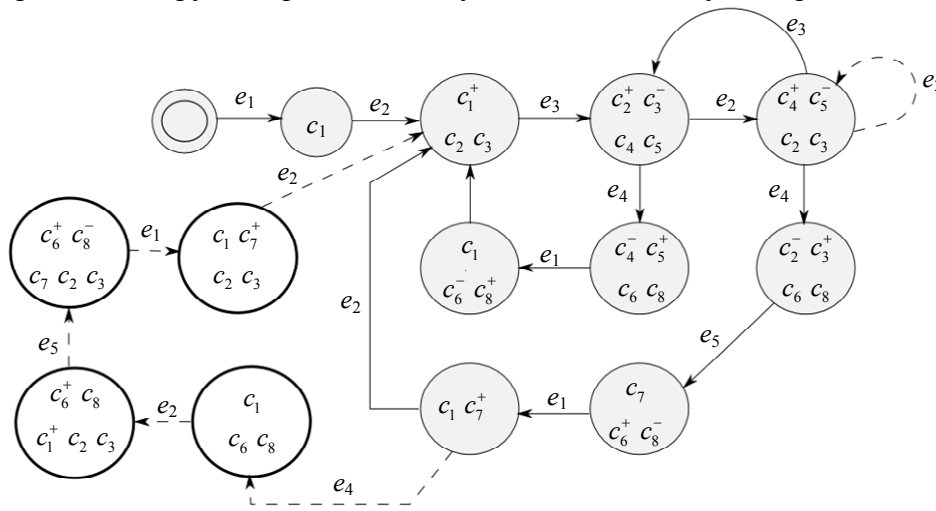


Рис. 3

Модель формируется динамически встроенными в СнК специальными блоками — мониторами — посредством фиксации событий E и выполнения действий R над цепочками из

множества S . В установленном режиме размер актуализированного графа является фиксированным и увеличивается только при обнаружении факта некорректного (не соответствующего эталонной модели) поведения системы.

Посредством удаления из графа актуализированной модели допустимых состояний можно выявить пути некорректного поведения системы: 1) $e_1 \rightarrow e_4 \rightarrow e_2 \rightarrow e_5 \rightarrow e_1 \rightarrow e_2 \rightarrow \dots$
 2) $e_2 \rightarrow e_2 \rightarrow \dots$. Таким образом, в течение одного цикла испытаний была сформирована актуализированная модель, анализ которой позволил обнаружить сразу несколько сбоев; при этом если с каждой дугой графа связать счетчик переходов, то можно получить информацию о частоте возникающих сбоев.

В рассмотренном примере не учитываются временные ограничения на последовательность событий и переходов — для этого требуется расширить правила спецификации цепочек, как показано в работе [7].

Следует также отметить, что в сложных системах переходы между разными состояниями эталонной модели могут описываться с помощью одинаковых цепочек. Так, переходы через состояния $St\ 3$ и $St\ 6$ модели, представленной на рис. 4, а, описываются одинаковой цепочкой $c_5 : e_3 \rightarrow e_4$. Определение цепочек, состоящих только из двух соседних событий (цепочки $c_1 - c_7$), может привести к построению некорректной актуализированной модели. На рис. 4, б показан актуализированный граф, где объединены состояния, обозначающие два различных пути эталонной модели. Для предотвращения этого необходимо определить дополнительные цепочки-маркеры (c_8, c_9), тогда актуализированная модель примет вид, показанный на рис. 4, в. Определение достаточного множества допустимых цепочек S может быть автоматизировано средствами САПР.

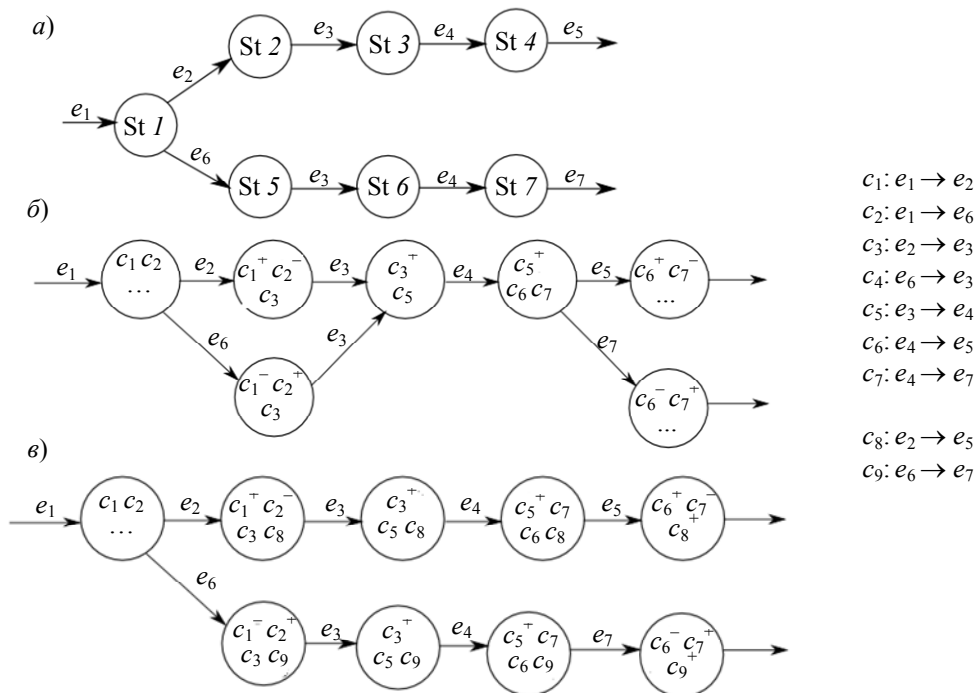


Рис. 4

Граф актуализированной модели является входными данными для задачи верификации. Проверка актуализированной модели на соответствие эталонной модели (функциональная верификация СнК) осуществляется средствами, встроенными или внешними по отношению к верифицируемой системе.

Проблема реализации метода связана со значительным временем обработки одного события. Например, в процессе натурных испытаний рассмотренной ИИС на ПЛИС обработка

одного события заняла 4 мс при тактовой частоте 50 МГц и среднем интервале между событиями 100 мс. Таким образом, метод не может быть использован для мониторинга „быстрых“ событий, связанных с изменением низкоуровневых сигналов, но применим для наблюдения за событиями со значительным интервалом следования, например коммуникационными транзакциями.

Выводы. Рассмотрены преимущества подхода к встроенной верификации системы на кристалле с использованием динамической актуализации функциональной модели, который, по сравнению с альтернативными методами, позволяет:

— проводить натурную верификацию системы на длительных интервалах времени (дни, недели, месяцы), что дает возможность выявлять плавающие, случайные и накапливающиеся ошибки, а также ошибки в результате непрогнозируемых внешних воздействий и т.п.;

— фиксировать последовательность событий, приводящих к сбою системы.

Предложенный метод — только часть методологии встроенной верификации, поэтапное развитие которой является перспективной задачей для будущих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wagner I., Bertacco V.* Post-Silicon and Runtime Verification for Modern Processors. Springer, 2011. P. 224.
2. *Metz E., Lencevicius R., Gonzalez T.* Performance data collection using a hybrid approach // Proc. of the 10th Europ. Software Engineering Conf. and 13th ACM SIGSOFT Intern. Symp. on Foundations of Software Engineering, Lisbon, Portugal, 5—9 Sept. 2005. P. 126—35.
3. *Zilic Z., Boule M.* Generating Hardware Assertion Checkers: for Hardware Verification, Emulation, Post-Fabrication Debugging and On-Line Monitoring. Springer, 2010. P. 280.
4. *Lee E. A., Sangiovanni-Vincentelli A.* Comparing models of computation // IEEE Computer Society. 1997. P. 234—241.
5. *Потанов А. С.* Распознавание образов и машинное восприятие: Общий подход на основе принципа минимальной длины описания. СПб: Политехника, 2007. 548 с.
6. *Карпов Ю. Г.* MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем. СПб: БХВ-Петербург, 2010. 560 с.
7. *Kustarev P., Bikovsky S., Pinkevich V.* Hardware violation monitor of transaction level real-time constraints for reliable systems on a chip // Proc. of 14th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM2014), Albena, Bulgaria, 17—26 June 2014. P. 201—208.

Сведения об авторе

Сергей Вячеславович Быковский

— аспирант; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники;
E-mail: bsv.serg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
22.12.14 г.

Ссылка для цитирования: *Быковский С. В.* Метод встроенной динамической актуализации функциональных моделей систем на кристалле // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 197—202.

METHOD OF EMBEDDED DYNAMIC ACTUALIZATION OF FUNCTIONAL MODEL OF SYSTEM ON A CHIP

S. V. Bikovsky

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: bsv.serg@gmail.com

A new method of formal model generation for system on chip (SoC) real-time functioning is proposed. The model is generated by embedded means of SoC during field tests or end-user operation.

The method can be used as a basis of the mechanism of SoC embedded runtime verification. In contrast to existing methods, requirements on instrumental memory size are decreased considerably.

Keywords: verification, functional model, fault, SoC, FSM, Kripke structure.

Data on author

Sergey V. Bikovsky — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Computer Science;
E-mail: bsv.serg@gmail.com

Reference for citation: *Bikovsky S. V. Method of embedded dynamic actualization of functional model of system on a chip // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 3. P. 197—202 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-197-202

**НЕРЕВЕРСИВНЫЙ ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УГЛА
НА ОСНОВЕ ДВУХДОРОЖЕЧНОЙ РЕКУРСИВНОЙ КОДОВОЙ ШКАЛЫ**

А. А. ОЖИГАНОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ojiganov@mail.ifmo.ru*

Предложен цифровой преобразователь угла, включающий в себя шкалу с двумя кодовыми дорожками и двумя считывающими элементами, а также схему обработки считываемой со шкалы информации.

Ключевые слова: *нелинейная последовательность, последовательность де Брейна, рекурсивная кодовая шкала, считывающие элементы, цифровой преобразователь угла.*

Постоянно возрастающие требования к характеристикам автоматизированных систем управления обуславливают необходимость непрерывного совершенствования их функциональных узлов. В современных системах управления и вычислительных устройствах для цифровой обработки информации используются цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, среди которых следует особо выделить цифровые преобразователи угла (ЦПУ), построенные по методу абсолютного считывания.

Основной конструктивный элемент таких ЦПУ — кодовая шкала (КШ), число информационных кодовых дорожек (КД) которой при классическом способе изготовления определяется разрядностью n выходного слова. Для достоверного считывания информации с такой кодовой шкалы используются $m=2n-1$ считывающих элементов (СЭ) [1].

В работе [2] рассмотрены рекурсивные кодовые шкалы (РКШ) всего с двумя (информационной и служебной) КД и двумя СЭ. На основе таких шкал построены рассматриваемые в настоящей статье нереверсивные ЦПУ с разрешающей способностью δ , равной разрешающей способности преобразователей с классическими КШ, маска которых выполнена в обыкновенном двоичном коде или в коде Грея, т.е. $\delta = 360^\circ/2^n$. Основой для получения рисунка информационной дорожки РКШ могут быть нелинейные двоичные последовательности (НП) $\{a_j\}=a_0, a_1, \dots, a_{B-1}$ двух типов, с длиной периода $B=2^n$:

1) нелинейные двоичные последовательности на основе псевдослучайных двоичных последовательностей максимальной длины (М-последовательностей); число таких НП равно числу М-последовательностей N_M , где $M=2^n-1$, а n — степень примитивного полинома, положенного в основу построения М-последовательности [3, 4];

2) нелинейные двоичные последовательности де Брейна; число последовательностей де Брейна $N_{DB} = 2^{2^{n-1}-n}$ [5].

Отметим, что число НП определяет множество рисунков информационной дорожки КШ. Число М-последовательностей и последовательностей де Брейна для различных значений n приведено в таблице.

n	N_M	N_{DB}
2	1	1
3	2	2
4	2	16
5	6	2048
...		
10	60	2^{502}

Как видно из таблицы, $N_{ДВ} > N_M$, что при одинаковом значении n дает дополнительные возможности для построения информационной дорожки КШ.

Правило получения символов последовательности $\{b_j\}=b_0, b_1, \dots, b_{B-1}$, используемых для формирования рисунка служебной дорожки РКШ, определяется как

$$b_{j+1} = \begin{cases} \bar{b}_j & \text{при } a_j = a_{j+1}, \\ b_j & \text{при } a_j \neq a_{j+1} \end{cases}$$

при $a_0=a_1=b_0=0$.

Два СЭ (информационный и служебный) должны быть расположены каждый на соответствующей дорожке на одной линии считывания.

Рассмотрим построение круговой двухдорожечной РКШ, для простоты ограничившись четырьмя разрядами преобразования.

Информационная дорожка шкалы выполнена в соответствии с нелинейной последовательностью $\{a_j\}=a_0, a_1, \dots, a_{15}=0000101111010011$, для построения которой использована одна из 16 последовательностей де Брейна с периодом $B=2^n=2^4=16$ [6]. Служебная дорожка шкалы выполнена в соответствии с последовательностью $\{b_j\}=b_0, b_1, \dots, b_{15}=0101111010000110$.

Линейная развертка четырехразрядной круговой двухдорожечной РКШ приведена на рис. 1: нулевым символам последовательностей соответствуют светлые (пассивные) элементарные участки (кванты) шкалы, а единичным символам — темные (активные). Информационный (СЭ_и) и служебный (СЭ_с) считывающие элементы, как и требуется, расположены на одной линии считывания.

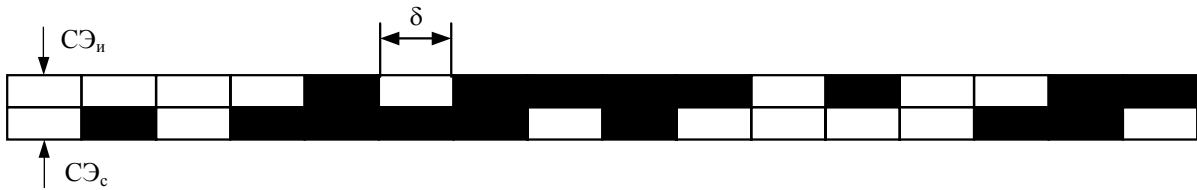


Рис. 1

На рис. 2 приведена структура n -разрядного нереверсивного цифрового преобразователя угла с двухдорожечной РКШ.

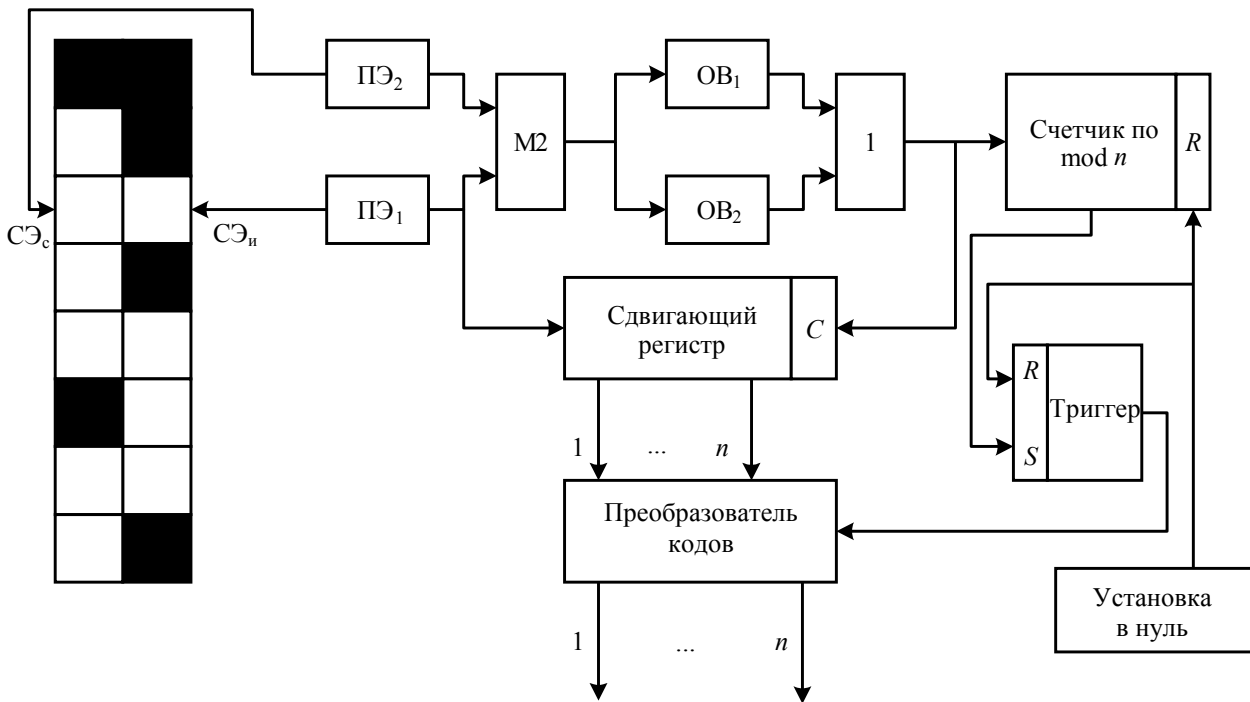


Рис. 2

Сигналы со считывающих элементов ($CЭ_n$ и $CЭ_c$) поступают на соответствующие пороговые элементы ($ПЭ_1$ и $ПЭ_2$), где они преобразуются в импульсы прямоугольной формы. Выход $CЭ_n$ через соответствующий $ПЭ_1$ соединен со входом сумматора по модулю два (M_2) и информационным входом n -разрядного сдвигающего регистра, а выход $CЭ_c$ через $ПЭ_2$ — с другим входом сумматора M_2 , выход которого связан со входами первого и второго одновибраторов ($ОВ_1$ и $ОВ_2$). Выходы одновибраторов соединены со входами схемы „ИЛИ“, выход которой связан с суммирующим входом счетчика по модулю n и с тактовым входом S сдвигающего регистра, выходы которого, в свою очередь, соединены с соответствующими входами преобразователя кодов (ПК). Выход счетчика по модулю n связан с установочным входом S триггера, единичный выход которого соединен с управляющим входом ПК.

Работа ЦПУ осуществляется следующим образом. При включении преобразователя триггер и счетчик по модулю n обнуляются. Далее при перемещении РКШ в одном направлении $CЭ_n$ и $CЭ_c$ взаимодействуют как с активными, так и с пассивными участками информационной и служебной дорожек шкалы. При взаимодействии $CЭ_n$ и $CЭ_c$ с активными участками дорожек с пороговых элементов снимается напряжение высокого уровня, а при взаимодействии с пассивными участками — низкого, что соответствует уровням логической единицы и логического нуля. При этом на выходе сумматора M_2 формируются импульсы прямоугольной формы, длительность которых зависит от скорости перемещения шкалы. На выходах одновибраторов вырабатываются короткие импульсы прямоугольной формы соответственно по переднему и заднему фронтам сигналов, поступающих на входы $ОВ_1$ и $ОВ_2$ с сумматора M_2 . Таким образом, на выходе логического элемента „ИЛИ“ при полном перемещении РКШ будет сформировано $B=2^n$ импульсов. Другими словами, каждый квант перемещения шкалы сопровождается выработкой короткого прямоугольного импульса.

При перемещении РКШ импульсы с выхода элемента „ИЛИ“ начинают поступать на суммирующий вход счетчика по модулю n и на тактовый вход сдвигающего регистра. Одновременно при перемещении шкалы в том же направлении сигналы, снимаемые элементом $CЭ_n$ с информационной дорожки и соответствующие высокому или низкому уровню напряжения, через $ПЭ_1$ начинают поступать на информационный вход сдвигающего регистра.

По импульсам, которые подаются на тактовый вход сдвигающего регистра, информационные сигналы последовательно слева направо заполняют ячейки его памяти. После поступления n -го импульса с выхода элемента „ИЛИ“ на суммирующий вход счетчика на выходе последнего вырабатывается импульс, устанавливающий триггер в единичное состояние. Сигнал с единичного выхода триггера подается на управляющий вход преобразователя кодов, после чего с него может быть снята информация о положении кодируемого объекта. После поступления n -го импульса на тактовый вход регистра в нем будет сформирован код, соответствующий пассивным и активным участкам информационной дорожки. При этом РКШ переместится на n квантов. При дальнейшем перемещении шкалы в том же направлении каждый последующий поступающий на тактовый вход регистра импульс „сдвигает“ код регистра на один разряд вправо, при этом на вход регистра одновременно поступают информационные сигналы.

При поступлении на тактовый вход сдвигающего регистра $B=2^n$ импульсов, начиная с n -го, в нем будет последовательно зафиксировано B различных n -разрядных кодовых комбинаций, что соответствует полному перемещению шкалы.

Преобразователь кодов после поступления на его управляющий вход единичного сигнала последовательно осуществляет преобразование $B=2^n$ различных n -разрядных кодовых комбинаций сдвигающего регистра, представленных в рекурсивном коде, в выходной n -разрядный код ЦПУ, например обыкновенный двоичный.

Таким образом, в нереверсивных ЦПУ на основе двухдорожечных РКШ первые $(n-1)$ квантов перемещения являются подготовительными, а при полном обороте шкалы (начиная с n -го

кванта) в сдвигающем регистре произойдет смена кодовых комбинаций, соответствующих B различным угловым положениям шкалы, что обеспечивает разрешающую способность $\delta = 360^\circ/2^n$.

Рассмотренные в данной статье ЦПУ не являются устройствами, построенными по методу абсолютного считывания, а занимают промежуточное положение между названными и устройствами кодирования, построенными по методу последовательного счета.

Области применения таких ЦПУ ограничены системами, в которых, например, после аварийного выключения источника питания, появления помехи или превышения допустимой скорости вращения вала, ограничивающей правильное считывание кода, кратковременная потеря значения кода не критична.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домрачев В. Г., Мейко Б. С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 328 с.
2. Ожиганов А. А., Прибыткин П. А. Использование нелинейных последовательностей при построении двухдорожечных кодовых шкал для преобразователей угловых перемещений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 39—44.
3. Агульник А. Р., Мусаелян С. С. Построение нелинейных двоичных последовательностей // Радиоэлектроника. 1983. № 4. С. 19—28.
4. Ожиганов А. А., Прибыткин П. А. Кодовые шкалы на основе нелинейных последовательностей для преобразователей угловых перемещений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. Вып. 4(68). С. 81—84.
5. Хачатрян Л. Г. Методы построения последовательностей де Брейна // Дискретная математика. 1991. Т. 3, № 4. С. 62—78.
6. Ожиганов А. А., Захаров И. Д. Применение последовательностей де Брейна для построения псевдорегулярных кодовых шкал // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Вып. 2(78). С. 69—74.

Сведения об авторе

Александр Аркадьевич Ожиганов — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра вычислительной техники; E-mail: ojiganov@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
11.12.14 г.

Ссылка для цитирования: Ожиганов А. А. Нереверсивный цифровой преобразователь угла на основе двухдорожечной рекурсивной кодовой шкалы // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 203—206.

NON-REVERSIBLE DIGITAL ANGLE CONVERTER ON THE BASIS OF THE DUAL-TRACK RECURSIVE CODE SCALE

A. A. Ozhiganov

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia,
E-mail: ojiganov@mail.ifmo.ru*

A digital converter of angle counts is proposed. The converter incorporates a scale with two code tracks and two counting elements, and a unit processing data obtained from the information scale.

Keywords: non-linear sequence, de Bruijn sequence, recursive code scale, counting elements, digital angle converter.

Data on author

Alexander A. Ozhiganov — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Computer Science; E-mail: ojiganov@mail.ifmo.ru

Reference for citation: Ozhiganov A. A. Non-reversible digital angle converter on the basis of the dual-track recursive code scale // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 203—206 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-203-206

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ОСЛАБИТЕЛЯ

Н. К. МАЛЬЦЕВА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: maltseva@grv.ifmo.ru*

Представлена методика оценивания коэффициента ослабления фотометрического ослабителя, составленного из двух ступеней — „френелевского“ типа и фотометрического шара.

Ключевые слова: *оптический ослабитель, поток излучения, фотометрический шар.*

Одной из задач при разработке многоступенчатого фотометрического ослабителя (ФМО), входящего в состав многоспектрального имитатора излучения точечных объектов [1], является теоретическая оценка величины обеспечиваемого коэффициента ослабления. С этой целью разработана методика оценивания ослабления оптического сигнала последовательно каждой ступенью схемы ФМО. Данная методика позволяет рассчитать величину потока оптического излучения на выходе ФМО, построенного по схеме двухступенчатого прибора с сохранением исходного угла расходимости пучка лучей. Методика составлена для наиболее общего пространственного и спектрального распределения потока излучения, проходящего через элементы ослабителя.

Для обеспечения широкого диапазона коэффициента ослабления представляется целесообразным построение ФМО по двухуровневой схеме ослабления: первая ступень — „френелевский“ ослабитель (отражающие клинья из оптического стекла), вторая ступень — фотометрический шар (ФМШ). При этом наиболее стабильная „френелевская“ ослабляющая ступень служит эталоном для менее стабильной — ФМШ. Комбинация этих элементов позволяет создать многоступенчатый ослабитель, гарантирующий не только широкий диапазон ослабления (при высоком общем ослаблении), но и мультипликативность общего коэффициента ослабления ФМО. Коэффициент ослабления определяется отношением потока излучения на входе ФМО к входному потоку: $K_{\text{осл}} = \Phi_{e\Delta\lambda, \text{вых}} / \Phi_{e\Delta\lambda, \text{вх}}$.

Оптическая схема одного из вариантов такого ослабителя [1] включает зеркальный сферический объектив, в фокальной плоскости которого расположена излучающая диафрагма абсолютно черного тела [2]. Параллельный пучок лучей падает на оптический клин, отражение от внешней грани которого обеспечивает ослабление потока излучения. После отражения пучок лучей фокусируется сферическим объективом и направляется плоским зеркалом на входную диафрагму ФМШ.

Рассмотрим последовательно преобразование потока излучения, поступающего в схему ослабителя от исходного излучателя O (рис. 1, a), имеющего малую излучающую диафрагму d_n . При заданной индикатрисе $I_e(\alpha, \beta) = I(\alpha, \beta)^*$ и функции спектрального распределения силы

* Здесь и во всех последующих обозначениях подстрочный индекс „ e “ опущен, так как они приводятся в системе энергетических фотометрических величин [3].

излучения источника поток излучения в апертуре пучка размером $4\alpha_0\beta_0$ в плоскости $o_1y_1z_1$ определяется по функции распределения облученности в этой плоскости.

Облученность в некоторой точке плоскости элемента I (см. рис. 1, а) выражается законом обратных квадратов расстояний [3]:

$$E_{\Delta\lambda_1}(y_1, z_1) = \frac{\mathbf{I}_{\Delta\lambda_{\text{пр}}}(\psi + \psi_0)}{l^2}, \quad (1)$$

где $\psi = \arccos \frac{l_1}{l} = \arcsin \left[\left(\frac{l_1}{l} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \vartheta + \sin^2 \gamma \right]^{1/2}$ — угол между вектором $\mathbf{I}_{\Delta\lambda_{\text{пр}}}$ силы излучения и

нормалью к плоскости $o_1y_1z_1$; l_1 — расстояние между излучателем O и плоскостью $o_1y_1z_1$, тогда

$$l = \left[l_1^2 + y_0^2 + z_0^2 + y_1^2 + z_1^2 + 2\sqrt{(y_0^2 + z_0^2)(y_1^2 + z_1^2)} \cos \left(\operatorname{arctg} \frac{y_0y_1 - z_0z_1}{y_1z_0 + y_0z_1} \right) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

при этом $\vartheta = \operatorname{arctg} \frac{z_0 - z_1}{l_1}$ и $\gamma = \arcsin \frac{y_0 - y_1}{l}$ — составляющие угла ψ в меридиональной и са-

гиттальной плоскостях пучка, ориентированных сечением плоскости $o_1y_1z_1$; ψ_0 — угол между вектором \mathbf{I}_0 максимальной силы излучения и нормалью к плоскости $o_0y_0z_0$;

$$\mathbf{I}_{\Delta\lambda_{\text{пр}}}(\psi + \psi_0) = I_{\lambda_{\text{max}}}(\psi + \psi_0) \int_{\Delta\lambda} i_{\lambda}(\lambda, \psi + \psi_0) \tau_{l_1}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

— приведенная к плоскости $o_1y_1z_1$ сила излучения источника O ; $I_{\lambda_{\text{max}}}(\psi + \psi_0)$ — максимальная спектральная плотность силы излучения; $i_{\lambda}(\lambda, \psi + \psi_0)$ — нормированная функция спектральной плотности силы излучения; $\tau_{l_1}(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания среды (область Oo_1).

Рассмотрим поток излучения, падающий на плоскость элемента I :

$$\Phi_{\Delta\lambda_1} = \int_{-y_{\text{п}}}^{y_{\text{п}}} \int_{-z_{\text{п}}}^{z_{\text{п}}} E_{\Delta\lambda_1}(y_1, z_1) dy_1 dz_1. \quad (4)$$

Тогда с учетом изложенного выражение (1) преобразуется к виду

$$E_{\Delta\lambda_1} = I_{\lambda_{\text{max}}}(\psi + \psi_0) \frac{\int_{\Delta\lambda} i_{\lambda}(\lambda, \psi + \psi_0) \tau_{l_1}(\lambda) d\lambda}{l^2} = \frac{I_{\lambda_{\text{max}}}(\psi + \psi_0) \Delta\lambda_{\text{пр}}(\psi + \psi_0)}{l^2}, \quad (5)$$

где

$$\Delta\lambda_{\text{пр}}(\psi + \psi_0) = \int_{\Delta\lambda} i_{\lambda}(\lambda, \psi + \psi_0) \tau_{l_1}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

— эквивалентный интервал длин волн излучения, падающего на элемент I ; $y_{\text{п}}$, $z_{\text{п}}$ — линейные размеры пятна на элементе I (см. рис. 1, а).

Если спектральный состав излучения не изменяется в пределах рассматриваемой апертуры пучка, т.е. $i_{\lambda}(\lambda, \psi + \psi_0) = i_{\lambda}(\lambda)$, то согласно выражению (6)

$$\Phi_{\Delta\lambda_1} = \Delta\lambda_{\text{пр}} I_{0, \lambda_{\text{max}}} \int_{-y_{\text{п}}}^{y_{\text{п}}} \int_{-z_{\text{п}}}^{z_{\text{п}}} \frac{F_I(\psi + \psi_0) dy_1 dz_1}{l^2}, \quad (7)$$

где $I_{0, \lambda_{\text{max}}}$ — максимальная спектральная плотность силы излучения в направлении, совпадающем с вектором \mathbf{I}_0 ; $F_I(\psi + \psi_0)$ — нормированная индикатриса излучения.

При круглой входной апертуре элемента l выражение (4) целесообразно записывать в полярных координатах [1]:

$$\Phi_{\Delta\lambda_1} = \int_0^{r_a} \int_0^{2\pi} E_{\Delta\lambda_1}(\rho, \psi) \rho d\rho d\psi, \quad (8)$$

где

$$\rho = \sqrt{y_1^2 + z_1^2}, \quad \psi = \arctg \frac{y_1}{z_1}, \quad (9)$$

т.е. в выражение (5) следует подставить уравнение (9) и величину r_a (радиус пятна рассматриваемого пучка в плоскости $o_1y_1z_1$).

Для источника Ламберта [3] справедливо $F_I(\psi + \psi_0) = \cos(\psi + \psi_0)$, тогда выражение (8) в линейных координатах плоскости $o_1y_1z_1$ примет вид

$$\Phi_{\Delta\lambda_1} = I_{\Delta\lambda_0} \int_{-y_n}^{y_n} \int_{-z_n}^{z_n} \frac{\cos(\psi + \psi_0) dy_1 dz_1}{l^2}, \quad (10)$$

где $I_{\Delta\lambda_0} = I_{0, \lambda_{\max}} \Delta\lambda_{\text{пр}}$, или в полярных координатах плоскости $o_1y_1z_1$ — вид

$$\Phi_{\Delta\lambda_1} = I_{\Delta\lambda_0} \int_0^{r_a} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\psi + \psi_0) \rho d\psi d\rho}{l^2(\rho, \psi)}. \quad (11)$$

Заметим, что в схеме ослабителя предполагается осевая юстировка эталонного излучателя O , поэтому в расчетных формулах можно принять $y_0 = z_0 = 0$ с погрешностью юстировки.

С учетом точного согласования апертур ($\beta_0/l, r_a, d_n/2$) пучков по нулевым лучам β_0, α_0 исходного пучка поток на выходе первой ступени ослабителя определяется по величине входного сигнала и спектральному коэффициенту пропускания первой ступени ослабителя $\tau_1(\lambda)$:

$$\tau_1(\lambda) = \tau_{l_2}(\lambda) R_1(\lambda) R_2(\lambda),$$

где τ_{l_2} — спектральный коэффициент пропускания для области o_1o_1 ; $R_1(\lambda), R_2(\lambda)$ — спектральные коэффициенты отражения первого и второго элементов оптической схемы (см. рис. 1, а).

В предположении, что спектральный состав потока излучения не изменяется в зависимости от направления лучей в пучке, целесообразно далее перейти (при условии согласования апертур) к нормированным спектральным характеристикам излучения. Относительное спектральное распределение потока излучения на выходе первой ступени ослабителя найдем по исходному распределению силы излучения $i_\lambda(\lambda)$ и спектральным коэффициентам пропускания τ_{l_1}, τ_{l_2} и $\tau_1(\lambda)$:

$$i_{\lambda 1}(\lambda) = i_\lambda(\lambda) \tau_{l_1}(\lambda) \tau_{l_2}(\lambda) \tau_1(\lambda). \quad (12)$$

Тогда, определив по формуле (10) или (11) величину потока $\Phi_{\Delta\lambda_1}$, можно перейти от нормированной функции $\phi_{\lambda 1}(\lambda)$ к функции

$$\Phi_{\Delta\lambda 1} = \frac{\Phi_{\Delta\lambda_1} \phi_{\lambda 1}}{d\lambda \sum_{m=1}^n (\phi_{\lambda 1})_m}, \quad (13)$$

где n — число элементарных участков равной протяженности, на которые разбивается весь значимый диапазон длин волн $\Delta\lambda$ функции $\Phi_{\lambda}(\lambda)$.

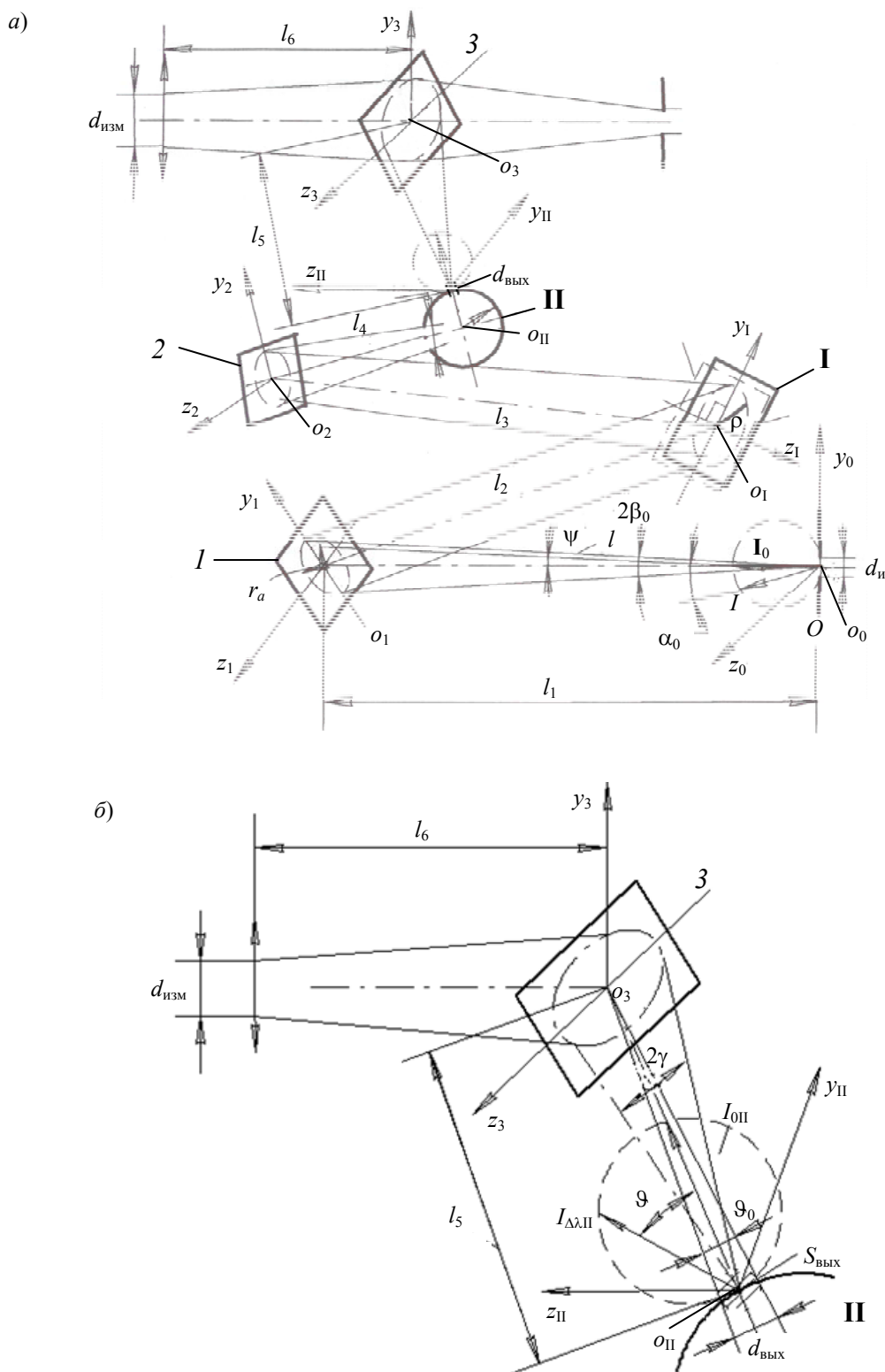


Рис. 1

Поток на входе второй ступени ослабителя определяется выражением

$$\Phi_{\Delta\lambda II} = \int_{\Delta\lambda} \Phi_{\Delta\lambda I}(\lambda) \tau_{l_3}(\lambda) \tau_{II}(\lambda) \tau_{l_4}(\lambda) d\lambda = \sum_{q=1}^p \Phi_{\lambda_q II}, \quad (14)$$

где $\Phi_{\lambda_q\Pi}$ — монохроматический поток излучения, сосредоточенный в малом q -м интервале длин волн $d\lambda$ (рис. 2).

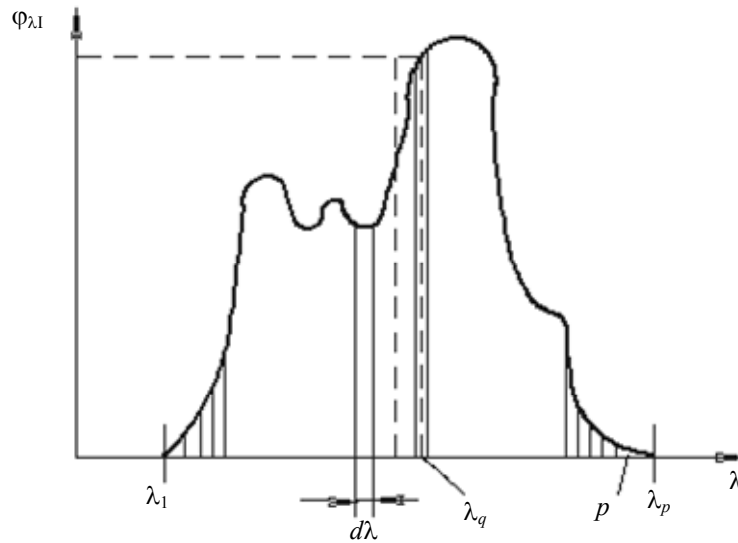


Рис. 2

Монохроматическая облученность выходной диафрагмы второй ступени ослабителя при $\lambda = \lambda_q$

$$E_{d\lambda\Pi} = \frac{\Phi_{\Delta\lambda\Pi}}{S_{\Pi}} \tau_{\Pi}(\lambda), \tag{15}$$

где $\Phi_{\Delta\lambda\Pi}$ определяется в виде ряда p значений по формуле (14); S_{Π} — площадь внутренней поверхности фотометрического шара (ступени II); $\tau_{\Pi}(\lambda)$ определяется для каждого q -го из p малых интервалов $d\lambda$.

Используя результат расчетов (15), можно далее получить функцию спектрального распределения облученности выходной диафрагмы $d_{\text{ВЫХ}}$ второй ступени в абсолютных значениях как серию p значений монохроматической (в малом интервале длин волн $d\lambda$) облученности:

$$E_{\lambda_q\Pi}(\lambda) = \frac{E_{d\lambda\Pi}}{d\lambda_q}. \tag{16}$$

Если известно распределение облученности по площади диафрагмы $d_{\text{ВЫХ}}$ (рис. 1, б), т.е. известна функция $E_{d\lambda\Pi}$, то построив согласно выражению (16) функцию $E_{\lambda_q\Pi}(\lambda)$, можно определить интегральную (энергетическую) облученность диафрагмы $d_{\text{ВЫХ}}$.

Поскольку для определения потока излучения на выходе элемента 3 (см. рис. 1, а) потребуется переход к индикатрисам излучения выходной диафрагмы $d_{\text{ВЫХ}}$ в форме четырехмерного распределения спектральной энергетической яркости от координат y_{Π}, z_{Π} и углов ϑ, γ (см. рис. 1, б) или двумерной индикатрисы силы излучения $I_{\Delta\lambda\Pi}(\vartheta, \gamma)$ с выходной диафрагмы $d_{\text{ВЫХ}}$ площадью $S_{\text{ВЫХ}}$, если телесный угол, определяемый углом ϑ_0 , мал, то можно с достаточной точностью принять диафрагму $d_{\text{ВЫХ}}$ за точечный излучатель.

Тогда индикатриса силы излучения

$$I_{\Delta\lambda\Pi}(\gamma) = KI_{0\Pi}F_{\Pi}(\gamma), \tag{17}$$

где $K = I_{\Delta\lambda\Pi} / I_{0\Pi}$ — нормированная по величине максимального вектора силы излучения $I_{0\Pi}$ индикатриса излучающей диафрагмы $d_{\text{вых}}$.

Расчет величины потока излучения, проходящего через входной зрачок $d_{\text{изм}}$ измерительного устройства, согласованного с апертурой проходящего пучка, осуществляется по формулам (1)—(14) применительно к элементу \mathcal{Z} , т.е. в координатах $o_3 y_3 z_3$ (см. рис. 1, а).

Здесь также предполагается согласование диаметра входной диафрагмы $d_{\text{изм}}$ с апертурой исходного пучка 2γ при достаточно малом значении $d_{\text{вых}}$.

Возможны некоторые упрощения вычислений, если считать, что в каждой точке диафрагма $d_{\text{вых}}$ излучает по закону Ламберта [3], и спектральный состав излучения не зависит от направления вектора яркости $\mathbf{L}_{\Delta\lambda}$. Если, кроме того, угол 2γ малый (см. рис. 1, б), тогда можно принять:

$$\Phi_{\Delta\lambda} = S_3 L_{\Delta\lambda\Pi} \int_{-y_{\text{ш}}}^{y_{\text{ш}}} \int_{-z_{\text{ш}}}^{z_{\text{ш}}} \frac{\cos(J(y_{\text{II}}, z_{\text{II}}))}{l_5^2(y_{\text{II}}, z_{\text{II}})} dy_{\text{II}} dz_{\text{II}}, \quad (18)$$

где S_3 — площадь элемента \mathcal{Z} ; $l_5 = l_5(y_{\text{II}}, z_{\text{II}})$; $J = J(y_{\text{II}}, z_{\text{II}})$ — угол падения лучей на элемент \mathcal{Z} ; $y_{\text{ш}}, z_{\text{ш}}$ — линейные размеры излучающей диафрагмы шара.

При последнем предположении и сравнительно большом угле 2γ выражение (18) примет следующий вид:

$$\Phi_{\Delta\lambda} = L_{\Delta\lambda\Pi} \int_{-y_{\text{ш}}}^{y_{\text{ш}}} \int_{-z_{\text{ш}}}^{z_{\text{ш}}} dy_{\text{II}} dz_{\text{II}} \int_{-y_3}^{y_3} \int_{-z_3}^{z_3} \cos(J_{\text{II}}(y_3, z_3, y_{\text{II}}, z_{\text{II}})) dy_3 dz_3,$$

где y_3, z_3 — линейные размеры пятна на элементе \mathcal{Z} .

Представленная методика оценивания величины потока излучения последовательно при прохождении отдельных элементов ослабителя является основой для расчета спектральных коэффициентов ослабления ФМО, составленного из двух ступеней — „френелевского“ типа и фотометрического шара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский А. В., Мальцева Н. К. Метод многоспектральной имитации излучения точечных объектов // Оптик. журн. 2010. Т. 77, № 2. С. 74—78.
2. А. с. 1242719, МКИ GOI J 1/02. Фотометрический ослабитель / А. В. Ильинский, Г. Г. Ишанин, Н. К. Мальцева. 1989.
3. Ишанин Г. Г., Козлов В. В. Источники излучения. СПб: Политехника, 2009. 325 с.

Сведения об авторе

Надежда Константиновна Мальцева — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: maltseva@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
12.02.14 г.

Ссылка для цитирования: Мальцева Н. К. Методика оценивания коэффициента ослабления двухступенчатого фотометрического ослабителя // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 207—213.

METHOD FOR ESTIMATING OPTICAL FLUX ATTENUATION BY TWO-STAGE OPTICAL ATTENUATOR

N. K. Maltseva

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: maltseva@grv.ifmo.ru

A method is proposed for evaluating optical flux attenuation by each stage of the two-stage photometric attenuator involving a Fresnel-type component and integrating sphere.

Keywords: optical attenuator, radiation flux, integrating sphere photometer.

Data on author

Nadezhda K. Maltseva — PhD, Associate Professor; ITMO University; Department of Optoelectronic Systems and Devices; E-mail: maltseva@grv.ifmo.ru

Reference for citation: *Maltseva N. K.* Method for estimating optical flux attenuation by two-stage optical attenuator // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 3. P. 207—213 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-207-213

МЕТОД РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ ПО ГЛУБИНЕ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Р. И. СМЕРНОВ¹, О. В. БУТУРЛИМОВ², Д. В. КАЗУНИН³

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sri7@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Россия

³ЗАО „Транзас Технологии“, 199178, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены известные методики расчета распределения давления, плотности, температуры и вязкости газожидкостной смеси по высоте подъемных труб в добывающей скважине; предложен метод, используемый в тренажерном комплексе, предназначенном для подготовки специалистов по освоению континентального шельфа.

Ключевые слова: распределение давления, распределение вязкости, распределение плотности газожидкостной смеси в скважине, добыча, тренажерный комплекс.

Для эффективного обучения и переподготовки кадров в нефтегазовой отрасли необходимы полномасштабные тренажерные комплексы, оснащенные физическими устройствами, максимально приближенными к реальным системам управления. В частности, ЗАО „Транзас Технологии“ (Санкт-Петербург) разработан тренажер морской ледостойкой стационарной платформы „Приразломная“ (рис. 1), имитирующий работу технологического оборудования, позволяющего выполнять бурение скважин, добычу нефти и газа, хранение и прямую отгрузку нефти на танкеры [1].



Рис. 1

Основную функцию в любом тренажерном комплексе выполняет математическая модель, позволяющая производить вычисления и обмениваться данными с интерфейсом. В настоящей статье предложен реализованный в математической модели тренажера метод расчета в режиме реального времени распределения давления, плотности, вязкости и температуры газожидкостной смеси по глубине добывающей скважины. Данные о распределении параметров являются необходимыми для подбора оборудования как добывающих скважин, так и предназначенных для поддержания пластового давления.

Постановка задачи. При добыче нефти из скважин знание характера распределения давления по длине подъемных труб позволяет выбрать наиболее рациональный способ извлечения продукта и определить оптимальный режим работы скважины. Кривые распределения давления в эксплуатационной колонне при заданном параметре расхода жидкости используются при выборе электроцентробежного насоса, а также для определения места расстановки пусковых клапанов и требуемого минимального расхода газа, обеспечивающего движение смеси до устья скважины при газлифтной добыче.

Методики расчета распределения давления в скважине. При теоретическом представлении газожидкостного потока используются гомогенная модель течения и модель течения со скольжением (относительной скоростью) фаз. Практические методы расчета газожидкостного потока можно классифицировать по особенностям модели, положенной в их основу.

Методы, основанные на гомогенной модели течения. Жидкость и газ рассматриваются как одна гомогенная смесь, обладающая усредненной плотностью без учета относительной скорости движения фаз и находящаяся в состоянии термодинамического равновесия. Необратимые потери давления, обусловленные трением и относительной скоростью, рассчитываются, по аналогии с однофазным потоком, на основе экспериментально полученной зависимости. К этому классу относится расчетный метод Поэтмана — Карпендера для газожидкостных потоков в вертикальных трубах круглого сечения. При течении высоковязких газожидкостных потоков область использования данного метода может быть расширена на основе результатов исследований, выполненных В. А. Сахаровым [2].

Методы, основанные на модели течения со скольжением. Общая особенность этих методов — конкретизация структуры потока на основе определяющих область его формирования параметров; определение необратимых потерь давления, обусловленных трением, скольжением и ускорением; учет влияния относительной скорости фаз. В нефтепромысловой практике используются метод Крылова и Лутошкина, метод Баксендела, метод, разработанный во ВНИИгаза [2].

В таблице приведены среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешности измерений для каждого из методов и область их применения в зависимости от дебита скважины ($Q_{ж}$), газового фактора ($R_{г}$), диаметра подъемника (d) и вязкости жидкости ($\mu_{ж}$) [2].

Метод расчета	$Q_{ж}$, м ³ /сутки	$R_{г}$, м ³ /т	d , м	$\mu_{ж}$, мПа·с	СКО, %
Поэтмана — Карпендера (В. А. Сахаров)	9,5—238,5	5,6—910	0,0507—0,0762	1—12	±8,39
Баксендела	230—2240	50—230	0,0380—0,0782	—	±6,73
Крылова — Лутошкина	8—540	0—400	0,0381—0,0762	1—15,2	±6,61
ВНИИгаза	—	—	0,015—0,106	1—250	±6,55

Важным показателем эффективности тренажерного комплекса является высокая скорость вычисления параметров модели на каждом шаге. Сравнительный анализ методов расчета показал, что метод Сахарова обладает наибольшим быстродействием. Погрешность метода не выходит за пределы допустимой погрешности тренажерного комплекса в целом (для имитационного моделирования — 10 %).

При разработке метода расчета распределения параметров смеси по глубине добывающей скважины принятый за основу метод Сахарова был дополнен вычислениями температуры по критерию Стантона, динамической вязкости по зависимости, предложенной И. И. Дунюшкиным [3, 4], и расчетом физических свойств нефти в процессе ее однократного разгазирования.

Алгоритм расчета параметров. Рассмотрим более подробно алгоритм, предложенный Сахаровым. При восходящем движении газожидкостной смеси в подъемных трубах давление и температура смеси уменьшаются, что приводит к изменению плотности, вязкости, газосодержания и других параметров газожидкостной смеси и соответственно к изменению

составляющих уравнения движения. Для элементарного подъемника малой длины, в пределах которой можно принимать параметры смеси неизменными, справедливо уравнение [2]

$$\Delta p = \Delta p_{\text{см}} + \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{ин}}, \quad (1)$$

где Δp — общая потеря давления; $\Delta p_{\text{см}}$ — потери давления, обусловленные гидростатическим столбом смеси; $\Delta p_{\text{тр}}$ — потери на трение; $\Delta p_{\text{ин}}$ — потери на инерционное сопротивление.

Распределение давления можно рассчитать также следующим образом:

$$\frac{dp}{dl} = \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{см}} + \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{тр}} + \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ин}}, \quad (2)$$

где l — длина участка подъемной трубы.

Для реального длинного подъемника необходимо проинтегрировать уравнение (2). Интегрирование в пределах длины L подъемных труб практически невозможно в связи с изменением термодинамических условий потока, поэтому расчет сводится к численному суммированию всех приращений давления Δp_i на каждом участке l подъемных труб:

$$p_1 + p_2 = \sum_{i=1}^n \Delta p_i,$$

где p_1 и p_2 — давление на забое и устье скважины соответственно; $n = L/l$ — число участков (шагов) изменения длины, чем больше шагов, тем точнее расчет.

Целесообразно вести расчет по принципу „сверху вниз“, т.е. от устья скважины к забою:

$$p_1 = p_2 + \sum_{i=1}^n \Delta p_i.$$

В качестве начальных условий при расчете используются давление и температура на устье, расчет ведется по шагам изменения давления Δp , при этом вычисляется приращение длины L_i между двумя сечениями труб, давление смеси на концах которых составляет p_{i-1} и p_i , т.е.

$$L_i = \frac{1}{dp/dt} \Delta p.$$

Параметры смеси определяются при средних арифметических значениях давления $\bar{p}_i = (p_{i-1} + p_i) / 2$ и температуры $\bar{T}_i = (T_{i-1} + T_i) / 2$.

Потери давления на скольжение и трение смеси рассчитываются на основе гомогенной модели и характеризуются экспериментально определяемым коэффициентом, позволяющим согласовать результаты расчета с данными фактических измерений [2]. Уравнение (1), с учетом принятых допущений, преобразуется к виду

$$\frac{\Delta p}{L} = \rho_{\beta} g + \lambda \frac{\rho_{\beta} w_{\text{см}}^2}{2d} = \rho_{\beta} g \left(1 + \frac{w_{\text{см}}^2}{2dg} \right),$$

где $\rho_{\beta} = \rho(1-\beta) + \rho_{\text{г}}\beta$ — „расходная“ плотность смеси, здесь ρ — плотность газонасыщенной нефти, β — объемное расходное газосодержание, $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа; $\lambda = \lambda_{\text{ск}} + \lambda_{\text{тр}}$ — коэффициент суммарных потерь давления на скольжение $\lambda_{\text{ск}}$ и трение $\lambda_{\text{тр}}$; $w_{\text{см}}$ — скорость подъема смеси.

На основе информации, полученной при исследовании скважин отечественных месторождений, Сахаровым установлено, что [2]

$$\lambda = \frac{1 + 0,13\text{Ku}}{1 + 1,13\text{Ku}} \frac{\rho - \rho_{\text{г}}}{\rho} \frac{2\beta}{\text{Fr}_{\text{см}}} + 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{\text{см}}} + 2 \frac{\varepsilon_{\text{ш}}}{d} \right)^{0,25},$$

где $Re_{см} = w_{см} d \rho / \mu_{ж}$ — критерий Рейнольдса для смеси; $\varepsilon_{ш}$ — эквивалентная шероховатость внутренней поверхности трубы; Ku — критерий Кутателадзе; $Fr_{см}$ — критерий Фруда для смеси.

На рис. 2 представлены кривые распределения давления, полученные по предложенной методике и методике Поэтмана — Карпентера для скважин со схожими параметрами (здесь h — высота подъемника, отсчитываемая от забоя к устью).

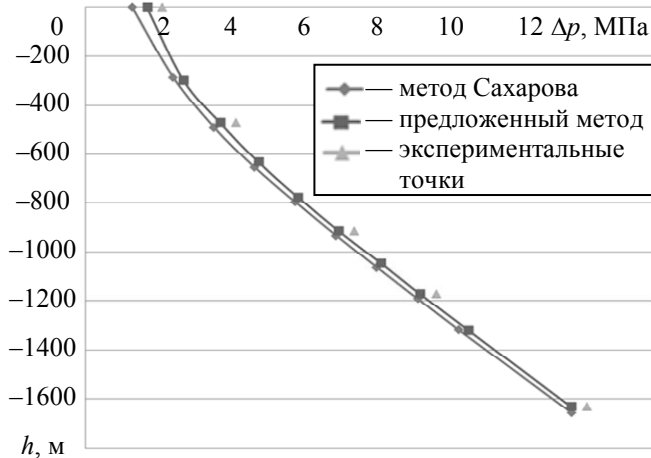


Рис. 2

Температуру смеси в любой точке по длине подъемных труб можно рассчитать по интерполяционной формуле (рис. 3)[2]:

$$T = T_2 + (T_1 - T_2) \frac{p - p_2}{p_1 - p_2},$$

где T_1 и T_2 — температура на забое и устье соответственно.

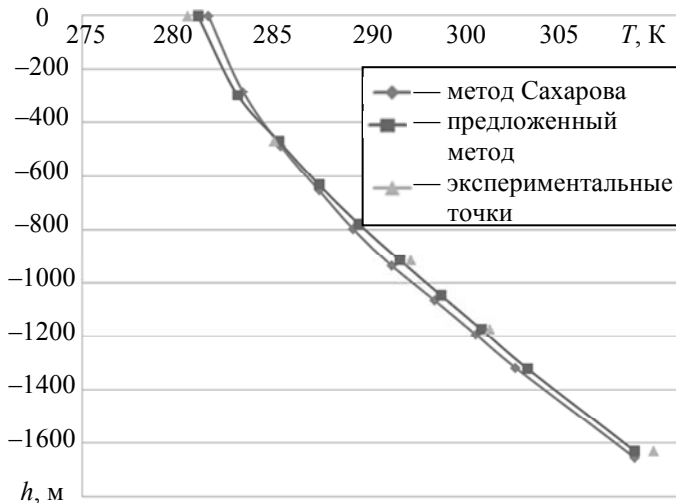


Рис. 3

При известном значении T_1 для определения температуры T_2 используется зависимость [3]

$$T_2 = T_{пл} \left(1 - St \frac{h}{d} \cos \alpha \right),$$

где $T_{пл}$ — температура флюида в пласте; St — безразмерный коэффициент Стантона; α — угол отклонения скважины от вертикали.

Для расчета динамической вязкости смеси как функции от температуры используется следующая зависимость [4]:

$$\mu_T = \frac{1}{C_1} (C_1 \mu_{T_0})^\chi, \quad \chi = \frac{1}{1 + C_0(T - T_0) \lg(C_1 \mu_{T_0})},$$

где μ_T, μ_{T_0} — динамическая вязкость дегазированной нефти при исходной температуре T и температуре T_0 при нормальных условиях; C_0, C_1 — коэффициенты, значения которых зависят от μ_{T_0} и μ_T .

Для расчета плотности газожидкостной смеси применяется метод, характеризующий ее движение в подъемнике, разгазирование нефти рассматривается как однократный процесс при переменных термодинамических условиях [1]. При расчете используются следующие исходные данные: плотность дегазированной нефти ($\rho_{н.д}$); динамическая вязкость дегазированной нефти; относительная по воздуху плотность газа ($\rho_{г.о}$); температура пласта; давление в пласте; давление насыщения нефти ($\rho_{н}$) при температуре пласта.

Определяется приведенный к нормальным условиям удельный объем выделившегося газа:

$$V_{г.в}(p, T) = R_T S(p) m(T) [D(T)(1 + S(p)) - 1],$$

где

$$S(p) = \frac{1 + \lg p}{1 + \lg p_{н}} - 1; \quad m(T) = 1 + 0,029(T - 293)(\rho_{н.д} \rho_{г.о} \cdot 10^{-3} - 0,7966),$$

$$D(T) = 10^{-3} \rho_{н.д} \rho_{г.о} (4,5 - 0,0305(T - 293)) - 4,785.$$

Затем рассчитывается остаточная газонасыщенность нефти в процессе ее разгазирования

$$V_{г.р}(p, T) = R_T m(T) - V_{г.в}(p, T)$$

и определяется относительная плотность выделившегося газа

$$\rho_{г.в}(p, T) = a[\rho_{г.о} - 0,0036(1 + S(p))(105,7 + uS(p))],$$

где $a = 1 + 0,0054(T - 293)$; $u = 10^{-3} \rho_{н.д} R_T - 186$.

Далее определяется относительная плотность растворенного газа, остающегося в объеме нефти при заданных условиях разгазирования [1]:

$$\rho_{г.р}(p, T) = R_T \left[am(T) \rho_{г.о} - \frac{\rho_{г.в}(p, T) V_{г.в}(p, T)}{R_T} \right] / V_{г.р}(p, T).$$

Рассчитываются объемный коэффициент b (предварительно определяется удельное приращение объема нефти за счет единичного изменения ее газонасыщенности $\gamma(T)$) и температурный коэффициент объемного расширения Θ дегазированной нефти при стандартном давлении:

$$b(p, T) = 1 + 1,0733 \frac{10^{-3} \rho_{н.д} V_{г.р}(p, T) \gamma(T)}{m(T)} + \Theta(T - 293) - 6,5 \cdot 10^{-4} p,$$

где

$$\gamma(T) = 10^{-3} \left[4,3 - 3,54 \cdot 10^{-3} \rho_{н.д} + \frac{1,0337 \rho_{г.р}(p, T)}{a} + 5,581 \cdot 10^{-6} \rho_{н.д} (1 - 1,61 \cdot 10^{-6} \rho_{н.д} V_{г.р}(p, T)) V_{г.р}(p, T) \right];$$

$$\Theta = \begin{cases} 10^{-3} (3,083 - 2,638 \cdot 10^{-3} \rho_{н.д}), & \text{если } 780 \leq \rho_{н.д} \leq 860; \\ 10^{-3} (2,513 - 1,975 \cdot 10^{-3} \rho_{н.д}), & \text{если } 860 \leq \rho_{н.д} \leq 960. \end{cases}$$

В результате определяется плотность газонасыщенной нефти (рис. 4):

$$\rho(p, T) = \rho_{н.д} \left[1 + 1,293 \cdot 10^{-3} \rho_{г.р}(p, T) V_{г.р}(p, T) / \alpha m(T) \right] / b(p, T).$$

Предложенный метод расчета параметров был использован в математической модели внедряемой термодинамической модели тренажерного комплекса. Пересчет распределения давления, плотности, вязкости и температуры осуществляется на каждом шаге работы модели, примерно 1 раз в секунду при обычном режиме работы и 25 раз в секунду — при ускоренном. Форма кривой распределения давления зависит как от характеристик флюида, так и от положения задвижек арматуры на устье, притока в скважину, диаметров эксплуатационной колонны и подъемника [5].

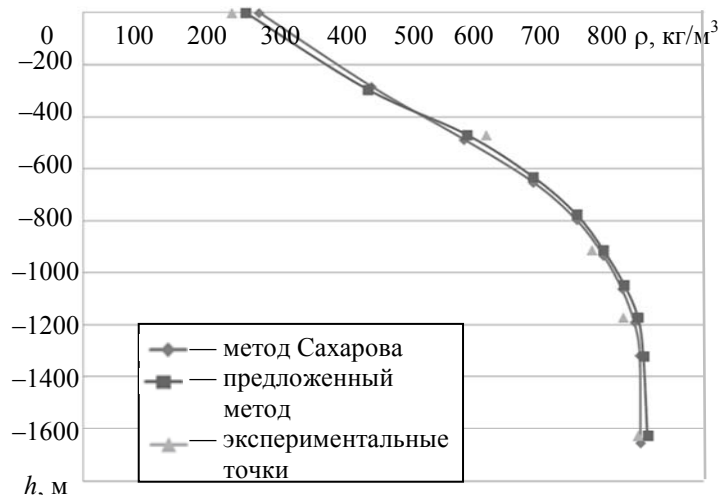


Рис. 4

Данные о распределении параметров газожидкостной смеси по глубине скважины являются исходными для решения большинства задач при добыче нефти. Использование этих данных позволяет вывести скважину на необходимый режим работы и более точно контролировать как стационарный, так и динамический уровень в скважине [5].

В заключение выделим наиболее значимые результаты работы:

— проанализированы известные методики расчета распределения давления, плотности, температуры и вязкости газожидкостной смеси по глубине добывающей скважины;

— предложен метод расчета распределения параметров газожидкостной смеси по высоте подъемных труб в добывающей скважине, в основу которого положен метод Сахарова, дополненный вычислениями температуры по критерию Стантона, динамической вязкости по зависимости, предложенной И. И. Дунюшкиным, и расчетом физических свойств нефти в процессе ее однократного разгазирования;

— разработанный метод внедрен в термодинамическую модель тренажера морской ледостойкой стационарной платформы „Приразломная“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казунин Д. В. Численное моделирование технологических процессов танкеров и терминалов: Монография. Новороссийск: МГА им. Ф. Ф. Ушакова, 2009. 266 с.
2. Мищенко И. Т., Сахаров В. А., Грон В. Г., Богомольный Г. И. Сборник задач по технологии и технике нефтедобычи: Учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1984. 272 с.
3. Бойко В. С. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. М.: Недра, 1996. 426 с.
4. Мищенко И. Т. Расчеты в добыче нефти. М.: Недра, 1993. 244 с.
5. Дунюшкин И. И., Мищенко И. Т., Елисеева Е. И. Расчеты физико-химических свойств пластовой и промысловой нефти и воды. М.: Нефть и газ, 2004. 447 с.

Сведения об авторах

- Роман Игоревич Смирнов** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: sri7@mail.ru
- Олег Валерьевич Бутурлимов** — СПбГУ, математико-механический факультет; ст. научный сотрудник; E-mail: oleg.buturlimov@mail.ru
- Дмитрий Владимирович Казунин** — д-р техн. наук, доцент; ЗАО „Транзас Технологии“; зам. генерального директора; E-mail: _dvk@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии
Университета ИТМО

Поступила в редакцию
19.05.14 г.

Ссылка для цитирования: Смирнов Р. И., Бутурлимов О. В., Казунин Д. В. Метод расчета распределения параметров газожидкостной смеси по глубине добывающей скважины // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 214—220.

**METHOD OF CALCULATING OF GAS-LIQUID MIXTURE PARAMETERS DISTRIBUTION
IN EXPLOITATION WELL DEPTH**

R. I. Smirnov¹, O. V. Buturlimov², D. V. Kazunin³

¹ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: sri7@mail.ru

²Saint Petersburg State University, 199034, Saint Petersburg, Russia

³CJSC “Transas Technology”, 199178, Saint Petersburg, Russia

The known methods of calculating pressure, density, temperature, and viscosity distributions in gas-liquid mixture along exploitation well lifting pipe are examined. A method now used in the training complex for specialists in continental shelf development is proposed for the application.

Keywords: pressure distribution, viscosity distribution, density distribution, exploitation, training complex.

Data on authors

- Roman I. Smirnov** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Measuring Technologies and Computer Tomography; E-mail: sri7@mail.ru
- Oleg V. Buturlimov** — Saint Petersburg State University, Mathematics and Mechanics Faculty; Senior Scientist; E-mail: oleg.buturlimov@mail.ru
- Dmitry V. Kazunin** — Dr. Sci.; CJSC “Transas Technology”; Deputy General Director; E-mail: _dvk@mail.ru

Reference for citation: Smirnov R. I., Buturlimov O. V., Kazunin D. V. Method of calculating of gas-liquid mixture parameters distribution in exploitation well depth // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 214—220 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-214-220

МИКРОФОННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НАПРАВЛЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

А. В. КРИВОШЕЙКИН, С. В. ПЕРЕЛЫГИН

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения,
191119, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sergey.pereygin@gmail.com*

Рассмотрен способ обработки сигнала в микрофонной решетке, состоящей из двух идентичных ненаправленных микрофонов. Сигнал получен от двух находящихся под разными углами к решетке источников широкополосных акустических сигналов. Предлагаемый способ обеспечивает направленный прием одного из сигналов и подавление второго. Выведены выражения для весовых коэффициентов решетки.

Ключевые слова: микрофонная решетка, акустическая антенна, узкополосный и широкополосный сигналы, спектры сигналов, взвешенное суммирование.

Для передачи и приема радиосигналов в радиосвязи, радиолокации, радиопеленгации и радионавигации используются антенные решетки, обеспечивающие заданную диаграмму направленности антенн. Для приема акустических сигналов применяются микрофонные решетки, формирующие заданную диаграмму направленности акустических антенн. Методы расчета антенных решеток основаны на использовании моделей приема либо гармонического, либо узкополосного сигнала. Акустические сигналы являются широкополосными.

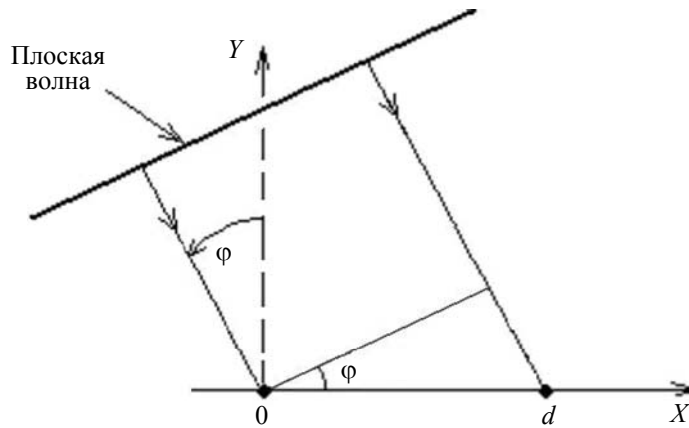
В настоящей статье рассматривается способ обработки акустического сигнала в микрофонной антенной решетке, состоящей из двух идентичных ненаправленных микрофонов. При наличии двух находящихся под разными углами к решетке источников широкополосных акустических сигналов предлагаемый способ обеспечивает направленный прием одного из сигналов и подавление другого.

Настройка микрофонной решетки на прием сигнала по одному или нескольким требуемым угловым направлениям осуществляется путем обработки сигнала в канале каждого микрофона и последующего взвешенного суммирования этих сигналов. Сама решетка при этом остается неподвижной: она не поворачивается к источнику сигнала, а настраивается на необходимый угол приема „электронным“ способом.

В самом общем случае настройка осуществляется введением линий задержки, компенсирующих временные рассогласования сигналов на выходах приемников. В случае приема узкополосного сигнала в канале каждого приемника производится выделение комплексной амплитуды сигнала и ее умножение на соответствующий взвешивающий коэффициент. В отличие от узкополосного сигнала с небольшим диапазоном изменения частот в спектре, для акустического сигнала, являющегося широкополосным, на разных частотах характерны разные соотношения между длиной акустической волны и фиксированным расстоянием между микрофонами. В результате на низких частотах решетка оказывается ненаправленной, а на высоких частотах имеет максимумы чувствительности при ложных угловых направлениях поступления сигнала [1, 2].

Рассмотрим случай, когда один источник широкополосного акустического сигнала с плоским волновым фронтом „воздействует“ на решетку, состоящую из двух одинаковых ненаправленных микрофонов (см. рисунок). Выберем положение осей координат так, чтобы оба

микрофона находились на оси X , при этом расположение левого (первого) микрофона совпадало с началом координат. Расстояние между микрофонами обозначим буквой d .



Если источник находится под каким-либо углом $\varphi = -90 \dots +90^\circ$ к оси Y , то сигналы на выходе первого и второго микрофонов будут иметь временной сдвиг τ , который, зная скорость распространения звука c , можно определить следующим образом:

$$\tau = \frac{d \sin \varphi}{c}. \quad (1)$$

Рассмотрим случай, когда на решетку „воздействуют“ два источника широкополосных акустических сигналов с плоскими волновыми фронтами, находящиеся под углами φ' и φ'' к оси Y . Углы φ' и φ'' могут быть заданы произвольно из диапазона $-90 \dots +90^\circ$.

Рассмотрим следующую задачу построения микрофонной антенной решетки:

- отклик решетки на первый источник сигнала с точностью до постоянной K должен быть равен отклику первого микрофона на сигнал первого источника;
- решетка **не** должна давать отклик на второй источник сигнала.

Для решения задачи предлагается заменить взвешенное суммирование сигналов во временной области, используемое при обработке узкополосных радиосигналов, взвешенным суммированием в частотной области.

Составляющие сигналов на выходе каждого микрофона — отклики на сигналы каждого из источников — и их спектры обозначим следующим образом: $x_1'(t)$ — составляющая сигнала на выходе первого микрофона (отклик на сигнал первого источника), $\dot{X}_1'(j\omega)$ — ее спектр (t — время, ω — циклическая частота, j — мнимая единица); $x_1''(t)$ — составляющая сигнала на выходе первого микрофона (отклик на сигнал второго источника), $\dot{X}_1''(j\omega)$ — ее спектр; $x_2'(t)$ — составляющая сигнала на выходе второго микрофона (отклик на сигнал первого источника), $\dot{X}_2'(j\omega)$ — ее спектр; $x_2''(t)$ — составляющая сигнала на выходе второго микрофона (отклик на сигнал второго источника), $\dot{X}_2''(j\omega)$ — ее спектр.

Суммарный сигнал $s_1(t)$ на выходе первого микрофона и его спектр $\dot{S}_1(j\omega)$ определяются выражениями

$$\begin{aligned} s_1(t) &= x_1'(t) + x_1''(t), \\ \dot{S}_1(j\omega) &= \dot{X}_1'(j\omega) + \dot{X}_1''(j\omega). \end{aligned} \quad (2)$$

Аналогично суммарный сигнал $s_2(t)$ на выходе второго микрофона и его спектр $\dot{S}_2(j\omega)$ определяются как

$$\begin{aligned} s_2(t) &= x'_2(t) + x''_2(t), \\ \dot{S}_2(j\omega) &= \dot{X}'_2(j\omega) + \dot{X}''_2(j\omega). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом составляющие $x'_2(t)$ и $x''_2(t)$ сдвинуты по времени относительно соответствующих составляющих $x'_1(t)$ и $x''_1(t)$ на величины τ' и τ'' , которые рассчитываются в соответствии с выражением (1). Тогда соотношения для составляющих $x'_2(t)$, $x''_2(t)$ и их спектров $\dot{X}'_2(j\omega)$, $\dot{X}''_2(j\omega)$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} x'_2(t) &= x'_1(t - \tau') = x'_1\left(t - \frac{d \sin \varphi'}{c}\right); \\ x''_2(t) &= x''_1(t - \tau'') = x''_1\left(t - \frac{d \sin \varphi''}{c}\right); \\ \dot{X}'_2(j\omega) &= \dot{X}'_1(j\omega) \exp(-j\omega\tau') = \dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{X}''_2(j\omega) = \dot{X}''_1(j\omega) \exp(-j\omega\tau'') = \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right). \quad (5)$$

Подставив выражения (4) и (5) в уравнение (3), получим

$$\dot{S}_2(j\omega) = \dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) + \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right). \quad (6)$$

Взвешенная сумма спектров сигналов на выходе обоих микрофонов является откликом решетки в спектральной области и равна

$$\dot{S}(j\omega) = w_1(j\omega) \dot{S}_1(j\omega) + w_2(j\omega) \dot{S}_2(j\omega), \quad (7)$$

где $w_1(j\omega)$ и $w_2(j\omega)$ — весовые коэффициенты.

Подставляя выражения (2) и (6) в уравнение (7), получаем

$$\begin{aligned} \dot{S}(j\omega) &= w_1(j\omega) \left(\dot{X}'_1(j\omega) + \dot{X}''_1(j\omega) \right) + \\ &+ w_2(j\omega) \left[\dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) + \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

В соответствии с поставленной задачей необходимо подобрать весовые коэффициенты, такие чтобы при подстановке их в выражение (8) выполнялось тождество

$$\dot{S}(j\omega) = K \dot{X}'_1(j\omega), \quad (9)$$

где K — произвольная постоянная.

Из выражений (8) и (9) следует соотношение

$$\begin{aligned} w_1(j\omega) \left(\dot{X}'_1(j\omega) + \dot{X}''_1(j\omega) \right) + \\ + w_2(j\omega) \left[\dot{X}'_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) + \dot{X}''_1(j\omega) \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right) \right] = K \dot{X}'_1(j\omega). \end{aligned} \quad (10)$$

Приравнивая коэффициенты при $\dot{X}'_1(j\omega)$ и $\dot{X}''_1(j\omega)$ в левой и правой частях выражения (10), получаем систему линейных уравнений относительно неизвестных функций $w_1(j\omega)$ и $w_2(j\omega)$:

$$\left. \begin{aligned} w_1(j\omega) + \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi'}{c}\right) w_2(j\omega) &= K, \\ w_1(j\omega) + \exp\left(-j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right) w_2(j\omega) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

решая которую, найдем выражения для весовых коэффициентов:

$$w_1(j\omega) = \frac{K}{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c}\right)}, \quad (12 \text{ а})$$

$$w_2(j\omega) = \frac{-K \exp\left(j\omega \frac{d \sin \varphi''}{c}\right)}{1 - \exp\left(j\omega \frac{d(\sin \varphi'' - \sin \varphi')}{c}\right)}. \quad (12 \text{ б})$$

Таким образом, поставленная задача решена.

В целях проверки работоспособности рассмотренного метода было проведено моделирование в среде MatLab.

В качестве исходных данных для моделирования использовались два речевых сигнала, воспроизводимые одним диктором. Тем самым были созданы условия, когда оба источника излучают акустические широкополосные сигналы в одинаковом диапазоне частот.

На подготовительном этапе произвольно задавались углы φ' и φ'' . Формировалась совокупность сигналов: $x'_1(t)$ и $x''_1(t)$ — сигналы, идентичные двум исходным; $s_1(t)$ — их сумма; $x'_2(t) = x'_1(t - \tau')$ и $x''_2(t) = x''_1(t - \tau'')$ — сигналы, сдвинутые по времени относительно исходных на величины τ' и τ'' , определяемые углами φ' и φ'' ; $s_2(t)$ — их сумма.

На этапе обработки вычислялись весовые коэффициенты по формулам (12 а) и (12 б). Методом выборок с помощью дискретного преобразования Фурье осуществлялся переход в частотную область: $s_1(t) \rightarrow \dot{S}_1(j\omega)$, $s_2(t) \rightarrow \dot{S}_2(j\omega)$. Для спектров сигналов по каждой выборке производилось взвешенное суммирование в соответствии с формулой (7). В завершение данного этапа осуществлялся обратный переход из частотной области во временную $\dot{S}(j\omega) \rightarrow s(t)$ и формировался результирующий сигнал из набора выборок.

На этапе субъективного оценивания результатов моделирования выполнялось сравнение сигналов $s(t)$ и $x'_1(t)$.

В результате оценивания сигналов было установлено следующее:

- один речевой сигнал подавляется полностью;
- второй речевой сигнал претерпевает искажения, субъективно воспринимаемые на слух как тембральные;
- разборчивость речи не ухудшается.

Таким образом, согласно предложенному методу обработки широкополосного акустического сигнала для построения микрофонных решеток необходимо перейти из временной области в частотную область. При этом результирующий сигнал должен быть получен с помощью взвешенного суммирования спектральных составляющих сигналов с последующим переходом во временную область. Результаты моделирования показали, что предложенный

принцип работы с широкополосным сигналом при построении микрофонной решетки обеспечивает допустимые искажения сигнала на выходе решетки по сравнению с исходным сигналом, поступающим от источника полезного сигнала. При этом обеспечивается подавление сигнала одного из источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
2. Ермолаев В. Т., Флакман А. Г. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой: Учеб.-метод. материалы. Нижний Новгород: ННГУ, 2007. 98 с.

Сведения об авторах

- Анатолий Валентинович Кривошейкин** — д-р техн. наук, профессор; СПбГИКиТ; кафедра радиотехники и информационных технологий; E-mail: krivav@yandex.ru
- Сергей Васильевич Перельгин** — аспирант; СПбГИКиТ; кафедра радиотехники и информационных технологий; E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

Рекомендована кафедрой
радиотехники и информационных
технологий

Поступила в редакцию
30.07.14 г.

Ссылка для цитирования: Кривошейкин А. В., Перельгин С. В. Микрофонная решетка для реализации направленной акустической антенны // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 221—225.

MICROPHONE ARRAY FOR DIRECTIONAL ACOUSTIC ANTENNA IMPLEMENTATION

A. V. Krivosheikin, S. V. Perelygin

Saint Petersburg State Institute of Cinema and Television, 191119, Saint Petersburg, Russia
E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

A new method of signal processing in microphone array is proposed. The array consisting of two identical omni-directional microphones is considered; the array receives signals from two broadband acoustic sources located in different angular positions relative to the array. The proposed method provides directional reception of signal from one source and attenuation of the other source signal. Mathematical expressions for microphone array weight coefficients are presented.

Keywords: microphone array, acoustic antenna, angular selectivity, narrowband and broadband signals, signal spectrum, weighted summation.

Data on authors

- Anatoly V. Krivosheikin** — Dr. Sci., Professor; Saint Petersburg State Institute of Cinema and Television, Department of Radiotechnics and Information Technologies; E-mail: krivav@yandex.ru
- Sergey V. Perelygin** — Post-Graduate Student; Saint Petersburg State Institute of Cinema and Television, Department of Radiotechnics and Information Technologies; E-mail: sergey.perelygin@gmail.com

Reference for citation: Krivosheikin A. V., Perelygin S. V. Microphone array for directional acoustic antenna implementation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 221—225 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-221-225

УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 83—473 К

П. И. ДИДЫК, В. Л. СЕМЁНОВ, А. А. БАСОВСКИЙ, А. А. ЖУКОВ

ОАО „Российские космические системы“, 111250, Москва, Россия

E-mail: felix_engine@mail.ru

Представлена установка для термоциклирования, обеспечивающая возможность проведения испытаний устройств и материалов к воздействию изменения температуры в диапазоне 83—473 К; предложенная установка позволяет достоверно определять устойчивость к воздействию со скоростью до 10 К/с.

Ключевые слова: установка для термоциклирования, термоциклы, испытания, диапазон температур 83—473 К.

Установки, предназначенные для испытаний конструкций и материалов на устойчивость к изменениям температуры, а также методы проведения испытаний достаточно широко описаны в литературе [1—7] и регламентированы различными стандартами [8—11]. Однако известные установки не обеспечивают соблюдения условий испытаний при воздействии температур от 83 до 473 К, что не позволяет достоверно оценить работоспособность устройств и материалов, температуры эксплуатации которых находятся в указанном диапазоне. В связи с этим актуальной задачей является разработка установки для термоциклирования, обеспечивающей возможность проведения испытаний в диапазоне 83—473 К.

Для решения поставленной задачи была спроектирована, изготовлена и апробирована установка, структурная схема которой представлена на рис. 1, а, где 1 — механизм перемещения контейнера; 2 — контейнер с образцами (устройствами и/или материалами); 3 — камера тепла; 4 — камера холода; 5 — испаритель. В камере тепла находятся герметичная кварцевая емкость, бесконтактный нагреватель и платиновый датчик температуры; в состав камеры холода входят емкость для хранения сжиженных газов (сосуд Дьюара), испаритель и два платиновых датчика температуры — в зоне испытания устройств и в объеме сжиженного газа (для контроля наличия газа); стойка управления содержит четыре преобразователя датчиков температуры, два таймера выдержки образцов (в камере тепла и в камере холода) и счетчик испытательных циклов (рис. 1, б).

Принцип работы установки заключается в следующем: испытания устройств и/или материалов осуществляются в течение непрерывно следующих друг за другом циклов, каждый из которых состоит из двух этапов.

1. Образцы (устройства и/или материалы) в контейнере помещают в камеру холода посредством механизма перемещения контейнера. Температуру в камере холода заранее доводят до нижнего рабочего значения температуры эксплуатации образца, и выдерживают его при этой температуре до достижения теплового равновесия.

2. После выдержки в камере холода образец помещают в камеру тепла посредством механизма перемещения контейнера. Температуру в камере тепла заранее доводят до верхнего рабочего значения температуры эксплуатации образца, и выдерживают его при этой температуре до достижения теплового равновесия.

Минимальное время перемещения образцов составляет не более 30 с. Термоциклограмма представлена на рис. 2.

По окончании последнего цикла образцы выдерживают при комнатной температуре до достижения теплового равновесия.

Охлаждение образцов происходит в камере холода за счет испарения жидкого азота. При этом интенсивность испарения, а следовательно, и температура в камере холода определяется мощностью испарителя. Нагрев в камере тепла происходит за счет мощности, выделяемой с бесконтактного нагревательного элемента. Таким образом, выдержка образцов осуществляется в инертной среде азота, что позволяет избежать образования ледяной корки и необратимых процессов окисления под действием повышенной температуры.

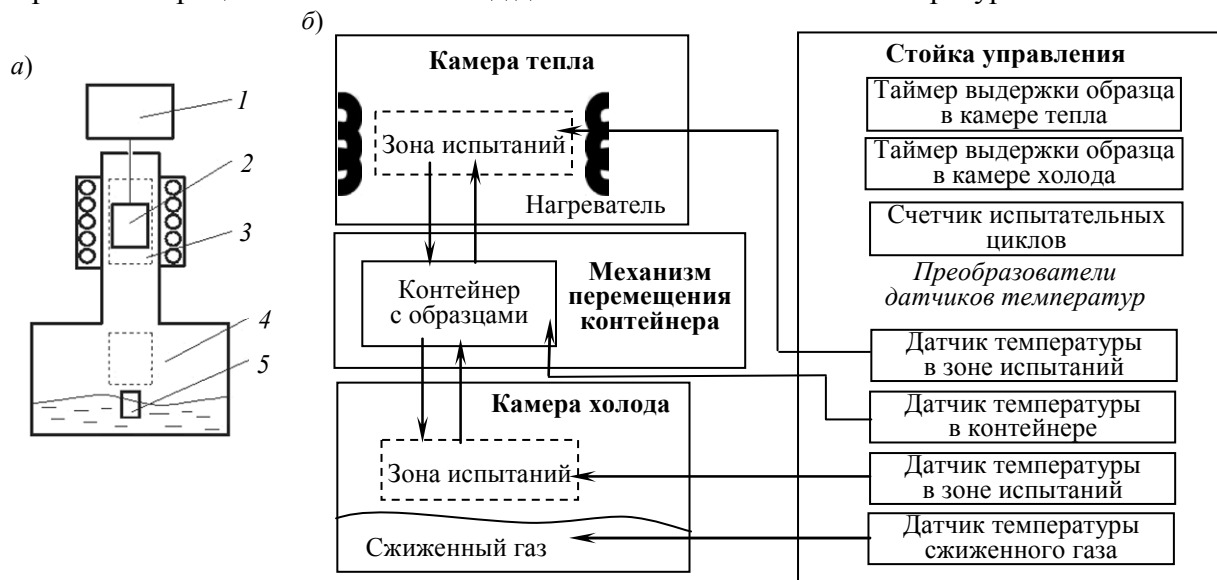


Рис. 1

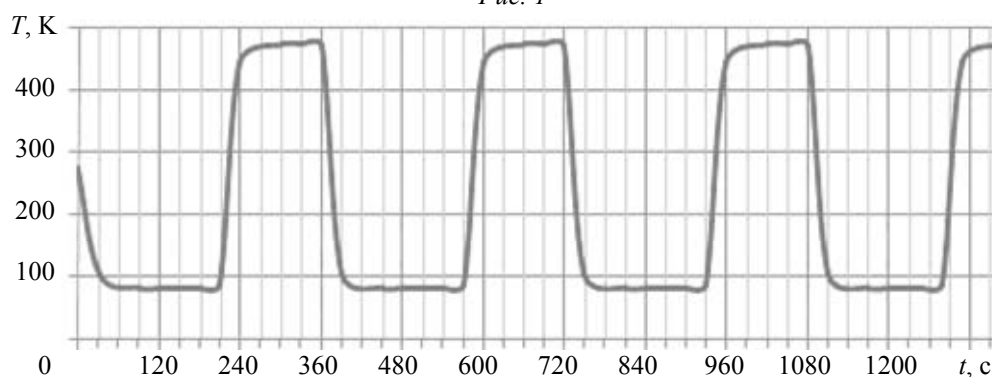


Рис. 2

Установка обеспечивает точность измерения температуры ± 4 К при испытаниях устройств с предельными размерами $40 \times 40 \times 50$ мм и суммарной массой не более 100 г. Наличие платиновых датчиков обеспечивает точность измерения температуры $\pm 0,2$ % [12] в контейнере с образцами, в камере тепла и в камере холода. Предложенная установка позволяет проводить граничные испытания и может быть использована в исследовательских целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электронный ресурс: <www.thermalproductsolutions.com>.
2. Электронный ресурс: <www.espec.com/na/products/thermal_shock/>.
3. Пат. SU1490600. Устройство для испытания полых изделий на термоудар / В. В. Никитин, Д. Г. Грак. Опубл. 30.06.89.
4. Пешес Л. Я., Степанов М. Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. Минск: Наука и техника, 1972. 168 с.
5. Колтаков А. О термоциклах и термоциклировании // Силовая электроника. 2006. № 2. С. 6—11.

6. Карташов Г. Д. Форсированные испытания. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 352 с.
7. Борцов В. Н., Листратенко А. М., Антонова В. А., Буеров Г. В., Семенов Л. П., Тымчук И. Т., Проценко М. А., Костышин Я. Я. Ускоренные форсированные термоциклические испытания солнечных батарей космического назначения // Технология приборостроения. 2011. № 1. 9 с.
8. MIL-STD-883E. Test Method Standard Microcircuit. Method 1010.7-Temperature Cycling: Intr. 31.12.96.
9. ECSS-E-10-03 A. Космическая техника. Испытания. Введ. 15.02.02.
10. ГОСТ Р 51368-99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры. М., 1999.
11. ГОСТ 30630.0.0-99 Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. М., 1999.
12. Электронный ресурс: <http://sensing.honeywell.com/product%20page?pr_id=23057>.

Сведения об авторах

- Павел Игоревич Дидык** — ОАО „Российские космические системы“; инженер-исследователь;
E-mail: felix_engine@mail.ru
- Виктор Львович Семёнов** — ОАО „Российские космические системы“; инженер-исследователь
- Андрей Андреевич Басовский** — ОАО „Российские космические системы“; ведущий научный сотрудник;
E-mail: abas36@mail.ru
- Андрей Александрович Жуков** — д-р техн. наук, доцент; ОАО „Российские космические системы“;
E-mail: and_zhukov@mail.ru

Рекомендована
ОАО „Российские космические
системы“

Поступила в редакцию
17.09.14 г.

Ссылка для цитирования: Дидык П. И., Семёнов В. Л., Басовский А. А., Жуков А. А. Установка для термоциклирования в диапазоне температур 83—473 К // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 226—228.

ТHERMOCYCLING SETUP FOR TEMPERATURE RANGE OF 83—473 K

P. I. Didyk, V. L. Semyonov, A. A. Basovsky, A. A. Zhukov

JSC "Russian Space Systems", 111250, Moscow, Russia

E-mail: felix_engine@mail.ru

A thermocycling setup temperature range of 83—473 K is demonstrated. The setup allows for testing of devices and materials for effects of temperature changes in the specified range, the experimental data on impact temperature variations are obtained with the speed up to 10 Kps.

Keywords: thermocycling setup, thermocycles, testing, temperature range of 83 — 473 K.

Data on authors

- Pavel I. Didyk** — JSC "Russian Space Systems"; engineer; E-mail: felix_engine@mail.ru
- Viktor L. Semyonov** — JSC "Russian Space Systems"; engineer
- Andrey A. Basovsky** — JSC "Russian Space Systems"; leading researcher;
E-mail: abas36@mail.ru
- Andrey A. Zhukov** — Dr. Sci.; JSC "Russian Space Systems"; E-mail: and_zhukov@mail.ru

Reference for citation: Didyk P. I., Semyonov V. L., Basovsky A. A., Zhukov A. A. Thermocycling setup for temperature range of 83—473 K // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 226—228 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-226-228

ДИНАМИКА ПРОВОДОВ ЛЭП ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО НИМ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

В. В. ЕЛИСЕЕВ, М. Р. БАХРАМИ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: yeliseyev@inbox.ru

Рассматривается движение диагностической машины-автомата по проводам линии электропередачи. При математическом моделировании движения используется лагранжева механика твердых и упругих тел с применением аппарата компьютерной математики: выявлены пилообразные колебания в вертикальной плоскости и поперечные движения типа параметрического резонанса.

Ключевые слова: диагностика проводов ЛЭП, колебания, лагранжева механика, параметрический резонанс, компьютерная математика.

Для исследования динамики проводов линий электропередачи создаются специальные диагностические машины-автоматы (ДМА) [1, 2]. Так, М. Р. Бахрами разработана оригинальная ДМА [3], включающая в себя моторизованные ведущие колеса, „руку“ с захватом и центральную коробку (рис. 1, а). Машина может проходить через различные препятствия на проводах (амортизаторы, зажимы, предупреждающие шары).

Однако работа подобных устройств может быть нарушена вследствие реакции проводов на различные воздействия [4]; например, даже при медленном движении ДМА по проводам возможны опасные колебания, приводящие к ее отказам или разрушению. Это обуславливает необходимость математического моделирования движения ДМА на стадии проектирования, чтобы выбрать приемлемые варианты конструкции машины, снизить затраты на эксперимент и обеспечить безопасность работы персонала.

В настоящей статье представлены результаты по разработке методики моделирования движения ДМА, включающей вывод уравнений динамики машины и решение их средствами компьютерной математики (MathCad). Уравнения выведены на основе механики Лагранжа для твердых и деформируемых тел с применением вариационного исчисления [5].

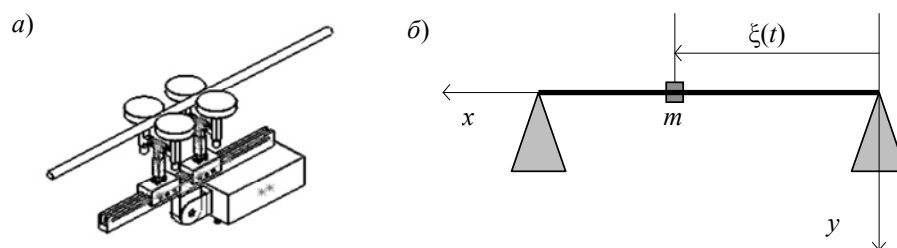


Рис. 1

Допустим, что провод является натянутой струной, ДМА — точечной массой, и движение происходит в вертикальной плоскости x, y (рис. 1, б).

В известной постановке задачи выражение для прогиба струны $u(x, t)$ имеет следующий вид:

$$Tu'' + P\delta(x - \xi(t)) = \rho\ddot{u}; \quad x = 0, l: u = 0; \quad t = 0: u = 0, \dot{u} = 0, \quad (1)$$

где T — сила натяжения струны; $P = mg$ — вес ДМА; ρ — погонная масса струны; l — длина струны; штрих и точка означают дифференцирование по координате x и времени t ; $\xi(t)$ — заданный закон движения нагрузки, причем $\xi(0) = 0$.

Выражение (1) представляет собой упрощенную постановку задачи, поскольку в динамике нагрузка может быть направлена не вертикально, и соответственно струна колеблется не в вертикальной плоскости.

Статическому приближению ($\rho = 0$) соответствует условие

$$u = U_S \begin{cases} \frac{x}{\xi}, & x < \xi; \\ \frac{l-x}{l-\xi}, & x > \xi, \end{cases} \quad U_S(\xi) = \frac{P}{T} \left(\frac{1}{\xi} + \frac{1}{l-\xi} \right)^{-1}.$$

Динамическое решение задачи (1) можно найти методом собственных функций. При $\xi = vt$ (движение ДМА с постоянной скоростью)

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) \varphi_n(x); \quad \varphi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \cdot \sin(\lambda_n x), \quad \lambda_n = \frac{n\pi}{l};$$

$$u_n = \frac{P}{\lambda_n(v^2 - c^2)} \sqrt{\frac{2}{T\rho l}} \cdot [v \sin(\lambda_n ct) - c \sin(\lambda_n vt)], \quad c = \sqrt{\frac{T}{\rho}}. \tag{2}$$

Как показали расчеты (в среде MathCad), прогиб в точке нагружения $u(vt, t)$ отличается от квазистатического $U_S(vt)$ только пилообразными колебаниями струны.

Учтем массу струны. При законе движения $\xi(t)$ и прогибе струны $u(x, t)$ имеем следующие выражения для координат, скоростей и ускорений движущейся массы:

$$x = \xi(t), \quad y = u(\xi(t), t) \Rightarrow \dot{x} = \dot{\xi}, \quad \dot{y} = u' \dot{\xi} + \dot{u}, \quad \ddot{x} = \ddot{\xi}, \quad \ddot{y} = u'' \dot{\xi}^2 + u' \ddot{\xi} + 2\dot{u}' \dot{\xi} + \ddot{u}.$$

Используем вариационную методику Лагранжа — Ритца — Канторовича [5]. Обобщенные координаты $U_i, i=1...k$, вводятся аппроксимацией прогиба $u(x, t) = \sum_{i=1}^k U_i(t) \varphi_i(x) = U^T(t) \varphi(x)$ (в матричных обозначениях). Координатные функции φ_i заданы такими же, как в уравнениях (2). Удвоенная кинетическая энергия струны при $\rho \neq 0$ определяется как

$$2K = m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \rho \int_0^l \dot{u}^2 dx = m \dot{\xi}^2 + \dot{U}^T [M + \mu(\xi)] \dot{U} + 2\dot{\xi} U^T \eta(\xi) \dot{U} + \dot{\xi}^2 U^T \sigma(\xi) U, \tag{3}$$

где введены матрицы $M = \int_0^l \rho \varphi \varphi^T dx$, $\mu = m \varphi \varphi^T$, $\sigma = m \varphi' \varphi'^T$, $\eta = m \varphi \varphi'^T$.

Определив потенциальную энергию

$$\Pi = \frac{1}{2} T \int_0^l u'^2 dx - Pu(\xi, t) = \frac{1}{2} U^T C U - U^T F(\xi), \quad C = T \int_0^l \varphi' \varphi'^T dx, \quad F = P \varphi(\xi) \tag{4}$$

и приняв $\dot{\xi} = v = \text{const}$, составим уравнения Лагранжа:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{U}} \right) - \frac{\partial K}{\partial U} &= - \frac{\partial \Pi}{\partial U}; \\ \frac{\partial K}{\partial \dot{U}} &= (M + \mu) \dot{U} + v \eta^T U; \\ \frac{\partial K}{\partial U} &= v \eta^T \dot{U} + v^2 \sigma U, \\ \frac{\partial \Pi}{\partial U} &= C U - F \Rightarrow (M + \mu) \ddot{U} + [C + v^2(\eta'(\xi) - \sigma)] U + v[\mu'(\xi) + \eta^T - \eta] \dot{U} = F. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Здесь производные по столбцу — это столбцы из производных по компонентам. Для квадратичных функций имеем $\partial(U^T C U)/\partial U = 2CU$. При этом заметим, что $\eta'(\xi)^T - \sigma = \kappa$, $\kappa(\xi) = m\varphi''^T$, $\mu'(\xi) + \eta^T - \eta = 2\eta$.

Правую часть последнего уравнения в системе (5) преобразуем к каноническому виду для последующего численного интегрирования ($\Lambda \equiv (M + \mu)^{-1}$):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= V, \\ \dot{V} &= \Lambda[F - (C + v^2 \kappa)U - 2v\eta V]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Важным для последующих расчетов является ускорение точечной массы

$$\begin{aligned} a &= v^2 u'' + 2v\dot{u}' + \ddot{u} = v^2 \varphi''^T U + 2v\varphi'^T \dot{U} + \varphi^T \ddot{U} = \\ &= [v^2 \varphi''^T - \varphi^T \Lambda (C + v^2 \kappa)] U + 2v(\varphi'^T - \varphi^T \Lambda \eta) V + \varphi^T \Lambda F. \end{aligned}$$

Система (6) решается численно (программа Rkadapt в пакете MathCad) при нулевых начальных условиях.

Заданы следующие значения параметров: $T = 10$ кН, $P = 1$ кН, $v = 1$ м/с, $\rho = 5$ кг/м, $l = 200$ м, число степеней свободы $k = 15$. На рис. 2, а—в соответственно представлены результаты расчета — временные зависимости прогиба струны в нагруженной точке $U_m(t) \equiv u(vt, t)$, скорости \dot{U}_m и ускорения \ddot{U}_m . Величина прогиба в данном случае сопоставима с решением (2), но скачкообразные изменения скорости, характерные для решения (2), отсутствуют, что является следствием аппроксимации при вариационном подходе.

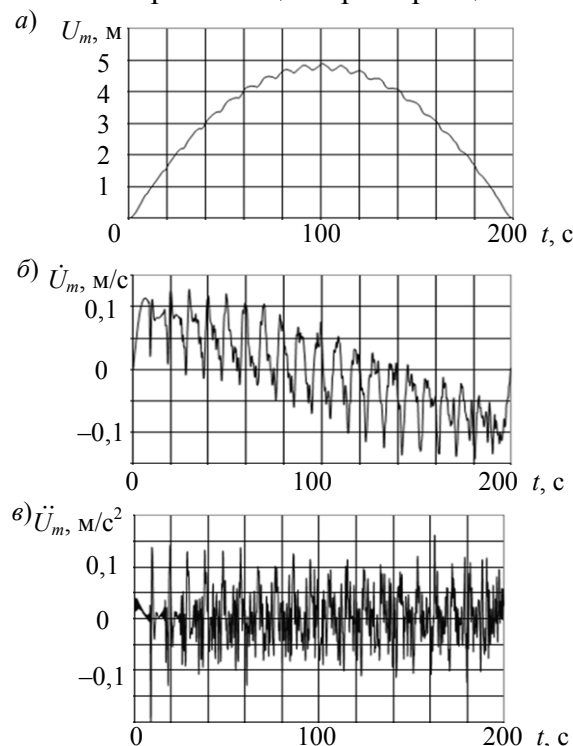


Рис. 2

Резким изменениям скорости соответствуют ударные импульсы сил инерции (переносного движения), возбуждающие параметрические колебания ДМА. Рассмотрим более сложную модель с движущимся по струне физическим маятником (рис. 3).

Координаты и скорость центра масс системы, при прогибах струны $u_y(x, t)$, $u_z(x, t)$ и угле отклонения $\theta(t)$ маятника, определяются выражениями

$$\begin{aligned} x &= \xi(t); \quad y = u_y(\xi, t) + \varepsilon \cos \theta; \quad z = u_z(\xi, t) + \varepsilon \sin \theta \Rightarrow \dot{x} = \dot{\xi}; \\ \dot{y} &= u_y' \dot{\xi} + \dot{u}_y - \varepsilon \dot{\theta} \sin \theta; \quad \dot{z} = u_z' \dot{\xi} + \dot{u}_z + \varepsilon \dot{\theta} \cos \theta, \end{aligned}$$

где ε — расстояние от центра масс до точки подвеса.

Кинетическая энергия тела

$$\begin{aligned} K_T &= \frac{1}{2}(mv_c^2 + I_c \dot{\theta}^2); \quad v_c^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 = \dot{\xi}^2(1 + u_y'^2 + u_z'^2) + \dot{u}_y^2 + \dot{u}_z^2 + \varepsilon^2 \dot{\theta}^2 + \\ &+ 2\dot{\xi}(u_y' \dot{u}_y + u_z' \dot{u}_z) + 2\dot{\xi} \varepsilon \dot{\theta}(-u_y' \sin \theta + u_z' \cos \theta) + 2\varepsilon \dot{\theta}(-\dot{u}_y \sin \theta + \dot{u}_z \cos \theta), \end{aligned} \quad (7)$$

где I_c — момент инерции относительно центра масс.

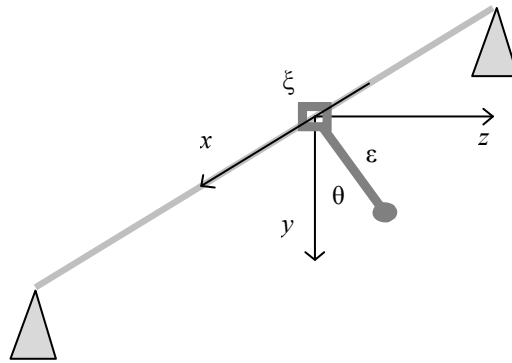


Рис. 3

Уравнения динамики, базирующиеся на выражении вида (7), слишком сложны. Поэтому положим величину u_y заданной и линеаризуем задачу, считая u_z , θ малыми величинами одного порядка. Тогда уравнение (7) преобразуется к виду

$$2K_T = m \left[\dot{\xi}^2 u_z'^2 + \dot{u}_z^2 + 2\dot{\xi} u_z' \dot{u}_z + 2\dot{\xi} \varepsilon \dot{\theta}(-u_y' \theta + u_z') + 2\varepsilon \dot{\theta}(-\dot{u}_y \theta + \dot{u}_z) \right] + (m\varepsilon^2 + I_c) \dot{\theta}^2 + \dots$$

Используем, аналогично вышеизложенному, вариационный подход:

$$\begin{aligned} u_z(x, t) &= \sum_{i=1}^n U_i(t) \varphi_i(x) = U^T(t) \varphi(x); \quad 2K = \rho \int_0^l (\dot{u}_y^2 + \dot{u}_z^2) dx + mv_c^2 + I_c \dot{\theta}^2 = \\ &= \dot{U}^T (M + \mu(\xi)) \dot{U} + \dot{\xi}^2 U^T \sigma(\xi) U + 2\dot{\xi} U^T \eta(\xi) \dot{U} + \\ &+ 2m\varepsilon \dot{\theta} (\dot{\xi} U^T \varphi'(\xi) + \dot{U}^T \varphi(\xi) - v_m \theta) + (m\varepsilon^2 + I_c) \dot{\theta}^2 + \dots, \end{aligned}$$

где $v_m \equiv \dot{u}_y + v u_y'$, а матрицы инерционных характеристик аналогичны принятым в выражении (3).

Потенциальная энергия

$$\Pi = \frac{1}{2} T \int_0^l (u_y'^2 + u_z'^2) dx - mg(u_y(\xi, t) + \varepsilon \cos \theta) = \frac{1}{2} (U^T C U + mg\varepsilon \theta^2) + \dots$$

Составим уравнения Лагранжа ($\dot{\xi} = v = \text{const}$):

$$\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{U}} \right) - \frac{\partial K}{\partial U} = - \frac{\partial \Pi}{\partial U}, \quad \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta} = - \frac{\partial \Pi}{\partial \theta}.$$

Определив производные

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{U}} = (M + \mu)\dot{U} + v\eta^T U + m\varepsilon\dot{\theta}\varphi, \quad \frac{\partial K}{\partial U} = v^2\sigma U + v(\eta\dot{U} + m\varepsilon\dot{\theta}\varphi');$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} = (m\varepsilon^2 + I_c)\dot{\theta} + m\varepsilon(\dot{U}^T \varphi(\xi) + vU^T \varphi'(\xi) - v_m\theta);$$

$$\frac{\partial K}{\partial \theta} = -m\varepsilon v_m \dot{\theta}; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial U} = CU, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = mg\varepsilon\theta,$$

перепишем уравнения следующим образом:

$$\begin{aligned} (M + \mu)\ddot{U} + 2v\eta\dot{U} + (v^2\kappa + C)U + m\varepsilon\ddot{\theta}\varphi &= 0, \\ (m\varepsilon^2 + I_c)\ddot{\theta} + m\varepsilon[\varphi^T \ddot{U} + 2v\varphi'^T \dot{U} + v^2\varphi''^T U + (g - a_m)\theta] &= 0, \\ a_m = \dot{v}_m = \ddot{u}_y + 2v\dot{u}'_y + v^2 u''_y. \end{aligned}$$

Далее разрешим систему относительно вторых производных; обозначив $\dot{U} = V$, $\dot{\theta} = \omega$, запишем систему обыкновенных дифференциальных уравнений в каноническом виде:

$$\dot{Y} = F(t, Y) = A(t)Y; \quad Y \equiv \begin{pmatrix} U \\ V \\ \theta \\ \omega \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & 0 \end{pmatrix},$$

$$A_{21} = -M_0^{-1}C_0, \quad A_{22} = -2\alpha v M_0^{-1}\eta, \quad A_{23} = \beta \varepsilon M_0^{-1}g_0\varphi,$$

$$A_{41} = \beta(\varphi^T M_0^{-1}C_0 - v^2\varphi''^T), \quad A_{42} = -2v\beta(\varphi'^T - \alpha\varphi^T M_0^{-1}\eta), \quad A_{43} = -\beta g_0(1 + m\beta\varepsilon\varphi^T M_0^{-1}\varphi),$$

$$M_0 \equiv M + \alpha\mu, \quad \alpha \equiv \frac{r_c^2}{\varepsilon^2 + r_c^2}, \quad \beta \equiv \frac{\varepsilon}{\varepsilon^2 + r_c^2}, \quad C_0 \equiv C + v^2\alpha\kappa,$$

где r_c — радиус-вектор центра масс.

Система решается в среде MathCad. На рис. 4, а, б представлены результаты расчета угла $\theta(t)$ и поперечного смещения $u_z(vt, t)$ системы при $\gamma \equiv \varepsilon = r_c = 0,02$ м и принятых выше значениях остальных параметров.

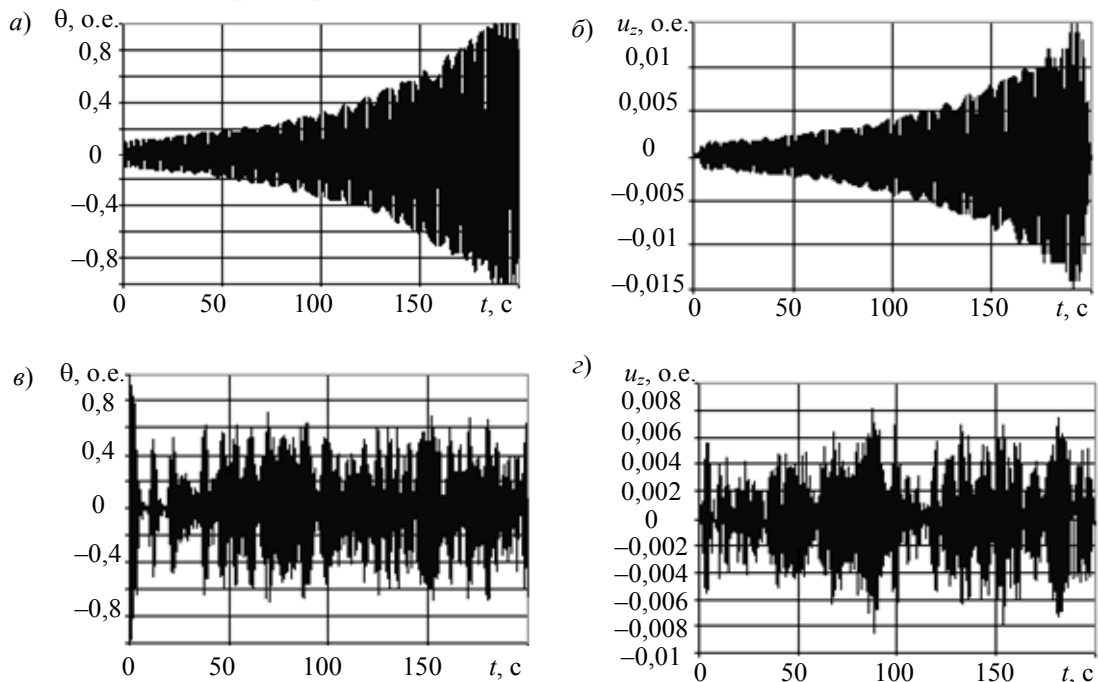


Рис. 4

Характер приведенных зависимостей позволяет говорить о параметрическом резонансе. Это — не классический тип резонанса, поэтому его можно исследовать, только используя аппарат компьютерной математики. В отличие от классического варианта [6], в данном случае отсутствует периодическое возбуждение. Однако при других значениях параметров системы результаты могут качественно измениться. Например, при $\gamma = 0,2$ наблюдаются ограниченные параметрические колебания, причем значение угла θ не превышает начального (рис. 4, в, з). Изменяя значение параметра γ , найдем, что при $\gamma \approx 0,06$ появляется резонанс: т.е. это значение γ — есть верхняя граница зоны неустойчивости. Несмотря на то, что нижнюю границу определить не удалось, можно утверждать — при уменьшении значения γ резонанс становится более выраженным.

Итак, при математическом моделировании движения ДМА по проводам линии электропередачи выявлены колебания системы — вертикальные пилообразные и поперечные параметрические. Многовариантные расчеты показывают, что параметрического резонанса можно избежать. Представленная методика позволяет построить области устойчивости в пространстве параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Разумовский И. Т.* Пирометр для контроля перегрева скруток проводов линий электропередач // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 43—48.
2. *Toussaint K., Pouliot N., Montambault S.* Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: state-of-the-art review and challenges ahead // J. of Field Robotics. 2009. N 26(5). P. 477—499.
3. *Bahrami M. R.* A novel design of electrical transmission line inspection machine // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 292—298.
4. *Гимадиев Р. Ш., Динмухаметов Ф. Ф., Галимуллин Н. Р.* Расчет пространственной динамики ЛЭП при совместном воздействии ветровой и весовой нагрузки // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3—4. С. 28—37.
5. *Елисейев В. В.* Механика деформируемого твердого тела. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 231 с.
6. *Зевин А. А.* К теории параметрических колебаний // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78, № 1. С. 46—59.

Сведения об авторах

- Владимир Васильевич Елисейев** — д-р физ.-мат. наук, профессор; СПбГПУ, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: yeliseyev@inbox.ru
- Мохаммад Реза Бахрами** — аспирант; СПбГПУ, кафедра машиноведения и основ конструирования; E-mail: mr.bahrami1982@gmail.com

Рекомендована кафедрой
машиноведения и основ
конструирования

Поступила в редакцию
22.12.14 г.

Ссылка для цитирования: *Елисейев В. В., Бахрами М. Р.* Динамика проводов ЛЭП при движении по ним диагностической машины // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 229—235.

DYNAMIC OF ELECTRICAL TRANSMISSION WIRES AT A DIAGNOSTIC MACHINE MOVEMENT ALONG THE LINE

V. V. Eliseev, M. R. Bahrami

Saint Petersburg State Polytechnical University, 195251, Saint Petersburg, Russia
E-mail: yeliseyev@inbox.ru

Traveling of an automatic diagnostic machine along electrical transmission line is considered. Mathematical modeling based on Lagrangian mechanics of rigid and flexible bodies is carried out with

the use of computer mathematics software. Saw tooth oscillations of the wires in the vertical plane and transversal movements of the type of a parametric resonance are revealed.

Keywords: diagnostic of electrical transmission line, oscillation, Lagrangian mechanics, parametric resonance, mathematical software.

Data on authors

- Vladimir V. Eliseev** — Dr. Sci., Professor; Saint Petersburg State Polytechnical University, Department of Machine Science and Mechanical Design;
E-mail: yeliseyev@inbox.ru
- Mohammad R. Bahrami** — Post-Graduate Student; Saint Petersburg State Polytechnical University, Department of Machine Science and Mechanical Design;
E-mail: mr.bahrami1982@gmail.com

Reference for citation: *Eliseev V. V., Bahrami M. R.* Dynamic of electrical transmission wires at a diagnostic machine movement along the line // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 3. P. 229—235 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-229-235

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТОМНО-ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ НА ПЗС-ЛИНЕЙКАХ

А. А. МАРЦУКОВ, Р. К. МАМЕДОВ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: martsukov@mail.ru

Рассматриваются аналитические возможности и метрологические характеристики промышленных атомно-эмиссионных спектрометров, использующих в качестве приемников оптического излучения ПЗС-линейки. Представлены результаты выполненных на базе этих приборов исследований по определению пределов обнаружения и сходимости измерений концентраций химических элементов в пробах металлов и сплавов.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный спектральный анализ, искровой спектрометр, позиционно-чувствительный детектор, ПЗС-линейка.

Атомно-эмиссионная спектроскопия — один из наиболее распространенных высокочувствительных экспресс-методов идентификации и количественного определения состава химических элементов в газообразных, жидких и твердых веществах, в том числе и в высокочистых. Метод основан на измерении интенсивности I света (количественный анализ), испускаемого на определенных длинах волн λ атомами (качественный анализ), возбужденными такими источниками, как индуктивно-связанная аргоновая плазма, низко- и высоковольтная искра, электрическая дуга, сверхвысокочастотный (микроволновый) разряд или пучок лазера. В атомно-эмиссионной спектрометрии образец подвергается действию высоких температур, достаточных не только для диссоциации необходимого объема вещества на атомы, но и для реализации значительного числа столкновений частиц, вызывающих возбуждение (и ионизацию) атомов пробы [1—3].

Преимущество атомно-эмиссионной спектроскопии по сравнению с другими методами анализа (оптическими спектральными, химическими, физико-химическими и т.д.) заключается в возможности бесконтактного количественного определения одновременно большого числа элементов в широком диапазоне концентраций с приемлемой точностью при использовании малой массы пробы. Метод не зависит от наличия стандартных образцов (которые могут быть смоделированы).

Широкие спектро-аналитические возможности рассматриваемых методов обусловили производство промышленно развитыми странами большой номенклатуры атомно-эмиссионных спектрометров. Несмотря на разнообразие схемных и конструктивных решений в таких приборах до последнего времени в качестве приемников оптического излучения использовались достаточно хорошо себя зарекомендовавшие фотоэлектронные умножители (ФЭУ). С появлением приемников с зарядовой связью отечественные и иностранные производители обратились к современным твердотельным приемникам изображения (позиционно-чувствительным детекторам, ПЗС-линейкам), которые по ряду показателей имеют определенные преимущества по сравнению с традиционными вакуумными передающими трубками. Эти преимущества открывают перспективу улучшения метрологических характеристик и аналитических возможностей таких приборов, повышения их чувствительности и точности, упрощения юстировки, увеличения количества спектральных линий и сокращения времени анализа, а также уменьшения габаритов, снижения себестоимости и энергопотребления спектральных приборов.

Одними из важнейших параметров, определяющих аналитические возможности и метрологические характеристики приборов, являются пределы обнаружения концентрации и сходимость результатов анализа химического состава исследуемых образцов. Однако практические исследования данных параметров до настоящего времени отсутствуют, что не позволяет подтвердить или опровергнуть эффективность применения позиционно-чувствительных детекторов в качестве приемников излучения в серийных атомно-эмиссионных спектрометрах.

В этой связи в аналитической лаборатории предприятия ЗАО „Спектральная лаборатория“ (Санкт-Петербург) были проведены исследования, целью которых было установление пределов обнаружения элементов в пробах и сходимости измерений с использованием атомно-эмиссионных спектральных (АЭС) приборов с ПЗС-линейками в качестве приемников излучения. Экспериментальные исследования проводились на опытном образце АЭС-прибора „МСА-V“ производства ЗАО „Спектральная лаборатория“ с десятью ПЗС-линейками. В качестве атомизатора использовалась низковольтная искра, выбор которой был обусловлен следующими соображениями [1—3]:

- обеспечивается относительно высокая энергия;
- повышающий трансформатор позволяет регулировать напряжение искры в пределах 10—15 кВ, т.е. варьировать условия эксперимента;
- факел имеет температуру порядка 10 000 К, вполне достаточную для возбуждения спектров анализируемых элементов пробы.

Первоначально были выполнены исследования по определению пределов обнаружения (L) элементов в различных пробах. Объектами анализа служили государственные стандартные образцы (ГСО), используемые для калибровки АЭС-приборов при исследовании марок сталей, чугунов, алюминиевых и медных сплавов.

Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элемент	L , %		
	Стали и чугуны	Алюминиевые сплавы	Медные сплавы
C	0,001—4,5		
S	0,002—0,3		0,002—0,3
P	0,002—1,0		0,002—1,0
Cu	0,1—4,0	0,05—12,0	Основа
Mn	0,05—5	0,002—2,0	0,002—7,0
Si	0,005—5	0,002—12,0	0,002—5,0
Cr	0,005—5	0,001—0,5	0,002—5,0
Ni	0,005—45,0	0,002—4,0	0,005—4,0
Fe	Основа	0,002—1,5	0,002—8,0
V	0,002—10,0	0,002—0,3	
Ti	0,002—3,0	0,002—0,3	
W	0,005—20,0		
Al	0,005—2,0	Основа	0,001—12,0
Co	0,005—10,0		0,005—2,0
Mo	0,005—10,0		0,005—1,0
Mg	0,001—0,5	0,05—12,0	0,002—1,0
Zn		0,001—10,0	0,001—45,0
Sn	0,002—0,5	0,002—15,0	0,002—0,3
Pb	0,005—0,5	0,005—1,0	0,005—15,0

Примечание. Пустые „ячейки“ в графах означают отсутствие/следовое содержание элемента в сплаве.

Приведенные в таблице значения, исходя из химического состава применяемых в промышленности сплавов, полностью соответствуют заданным при измерениях, осуществляемых приборами такого класса.

Исследования сходимости аналитических измерений базировались на результатах анализа углеродистых и легированных сталей по содержанию углерода. В качестве программного обеспечения использовалась разработанная в ЗАО „Спектральная лаборатория“ универсальная программа „Grad 5“, предназначенная для любых моделей атомно-эмиссионных спектрометров. Используемый в программе алгоритм позволяет с помощью градуировочных графиков рассчитать концентрацию химических элементов исходя из относительной интенсивности их излучения, измеряемой прибором после прохождения потока излучения через оптическую систему. Программа позволяет в полной мере реализовать такие преимущества ПЗС-линеек (по сравнению с ФЭУ), как выбор неограниченного числа спектральных линий, полный диапазон измерений (без разрывов спектральной картины) и коррекция темнового тока на приемнике излучения. В программе также рассчитывается относительная средняя квадратическая погрешность единичного измерения (S_r , %) в каждой серии из n измерений для каждого анализируемого элемента. Это позволяет оценить, удовлетворительна ли сходимость результатов измерений, путем сравнения полученного в программе значения S_r с величиной вычисленной допускаемой относительной средней квадратической погрешности единичного измерения ($\sigma_{\text{доп}}$, %) по требованиям ГОСТ 18895-97 [4]:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{d_{\text{сх}}}{2,77 \cdot c_{\text{ат}}} \cdot 100 \%,$$

где $d_{\text{сх}}$ — сходимость результатов единичного измерения в серии из n измерений; 2,77 — константа для распределения коэффициента Стьюдента для серии из n измерений; $c_{\text{ат}}$ — аттестованное по паспорту стандартного образца содержание в нем химического элемента.

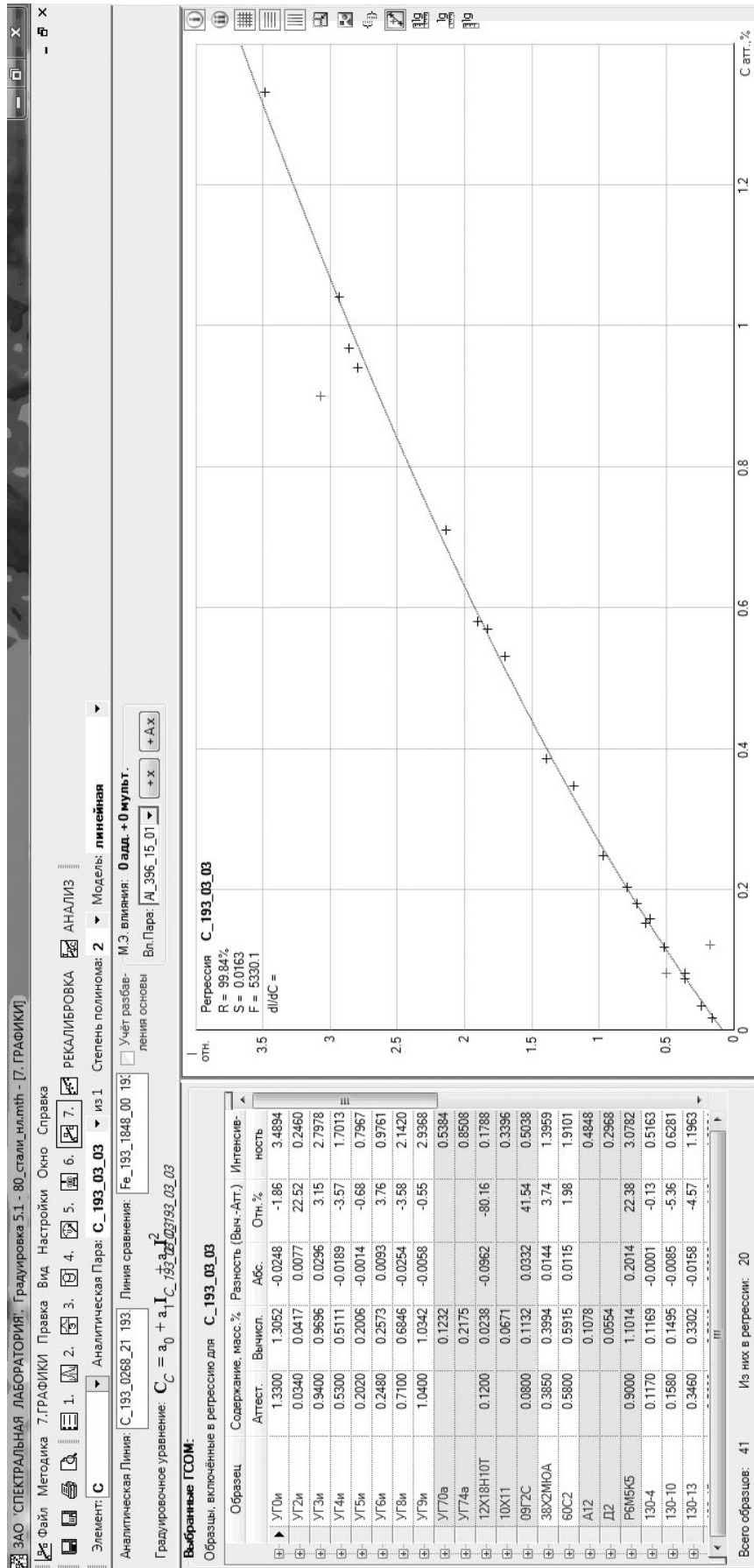
Результаты исследований, полученные с использованием прибора „МСА-V“, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон концентраций углерода, %, по паспорту ГСО	Измеренные значения концентрации углерода, %, в определенном ГСО	S_r , %	$\sigma_{\text{доп}}$, %
0,02—0,05	0,021 (1ФМ6)	10,4	12,0
0,05—0,10	0,076 (1ФМ2)	2,9	4,7
	0,080 (1ФМ5)	2,7	4,5
	0,080 (1ФМ29)	3,9	4,5
	0,097 (1ФМ28)	2,8	3,7
0,10—0,20	0,137 (1ФМ1)	2,9	3,4
	0,139 (УГ7Г)	1,8	3,4
0,20—0,50	0,213 (1ФМ3)	1,4	3,4
	0,279 (1ФМ18)	2,5	2,6
0,50—1,00	0,690 (1ФМ25)	1,3	1,6
	0,959 (1ФМ9)	0,9	1,1

Анализ таблицы показывает, что для всех измеренных концентраций углерода в различных образцах полученные значения S_r находятся в поле допустимых стандартом [4].

На рисунке представлен интерфейс программы, где показан градуировочный график зависимости концентрации (C) химического элемента (углерода) от интенсивности свечения I его аналитической линии, построенный по методике анализа низколегированных сталей программы „Grad 5“. В таблице (см. рисунок) отражены аттестованные в паспорте ГСО и вычисленные по графику значения концентрации углерода для каждого стандартного образца, а также абсолютная и относительная погрешности измерений этих значений. Как показывает сравнение этих значений с данными табл. 2, они не превышают допустимых по ГОСТ 18895-97.



Таким образом, выполненные на базе атомно-эмиссионного прибора „МСА-V“ исследования позволили дать количественную оценку пределам обнаружения и сходимости измерений концентрации различных элементов в пробах. Полученные результаты наглядно подтверждают эффективность и целесообразность использования позиционно-чувствительных детекторов в качестве приемников излучения в промышленных атомно-эмиссионных спектральных приборах. Предложенный подход позволяет расширить аналитические возможности таких приборов, улучшить их метрологические характеристики и обеспечить более прогрессивные эксплуатационные качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пейсахсон И. В.* Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
2. *Зайдель А. Н.* Основы спектрального анализа. М.: Наука, 1965. 324 с.
3. Эмиссионная фотометрия пламени и атомно-абсорбционная спектроскопия: Электронное учеб. пособие. Казань, 2009 [Электронный ресурс]: <<http://old.kpfu.ru/f7/docs/garifzyanov.pdf>>.
4. ГОСТ 18895-97 Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа. Введ. с 01.01.97. Минск: Изд-во стандартов, 1998. 15 с.

Сведения об авторах

- Алексей Александрович Марцуков** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: martsukov@mail.ru
- Роман Камильевич Мамедов** — д-р техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: romamedov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники
и видеоинформатики

Поступила в редакцию
29.09.14 г.

Ссылка для цитирования: *Марцуков А. А., Мамедов Р. К.* Метрологические исследования атомно-эмиссионных спектрометров на ПЗС-линейках // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 236—240.

METROLOGICAL STUDY OF ATOMIC EMISSION SPECTROMETERS BASED ON CCD LINES

A. A. Martsukov, R. K. Mamedov

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: martsukov@mail.ru

Analytical capabilities and metrological characteristics of commercial atomic emission spectrometers using CCD lines as optical detectors are studied. Results of experiments on detection limits and accuracy of measurements of chemical elements concentrations in samples of metals and alloys are presented.

Keywords: atomic emission spectral analysis, spark spectrometer, position-sensitive detector, CCD line.

Data on authors

- Alexey A. Martsukov** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Computer Photonics and Digital Video Processing; E-mail: martsukov@mail.ru
- Roman K. Mamedov** — Dr. Sci.; ITMO University; Department of Computer Photonics and Digital Video Processing; E-mail: romamedov@yandex.ru

Reference for citation: *Martsukov A. A., Mamedov R. K.* Metrological study of atomic emission spectrometers based on CCD lines // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 236—240 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-236-240

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 519.711.72
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-241-243

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ НА БАЗЕ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ

В. А. ЗЕЛЕНЦОВ¹, И. Н. КРЫЛЕНКО², И. Ю. ПИМАНОВ¹, С. А. ПОТРЯСАЕВ¹,
Б. В. СОКОЛОВ¹, Й. АХТМАН³

¹Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sokol@iias.spb.su

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия

³Федеральная политехническая школа Лозанны, 1015, Лозанна, Швейцария

Рассмотрены основы построения универсальной интеллектуальной информационной системы обработки данных дистанционного зондирования Земли на базе сервис-ориентированной архитектуры, приведен пример реализации системы для задачи оперативного прогнозирования наводнений.

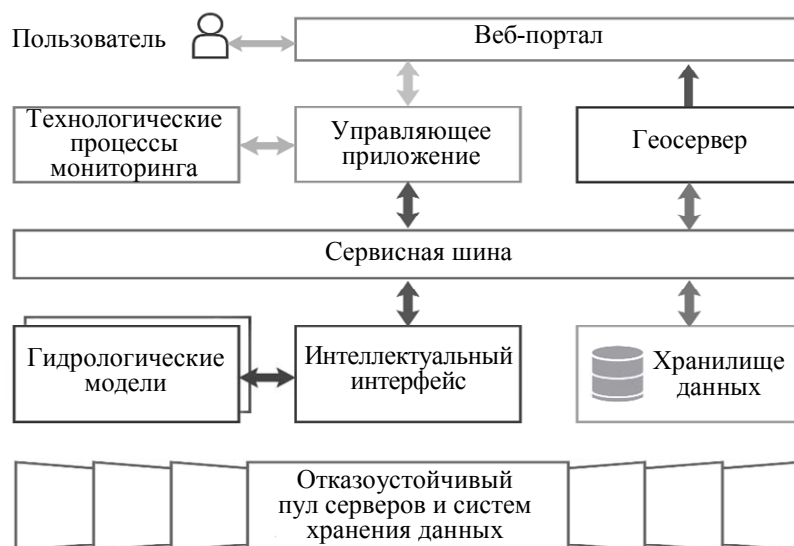
Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, сервис-ориентированная архитектура, интеллектуальный интерфейс.

Решение широкого круга задач с использованием данных дистанционного зондирования Земли предполагает интегрированную обработку в рамках единых систем мониторинга как космической, так и наземной информации, а также построение программных комплексов, обеспечивающих совместное функционирование разнородных моделей природных и технологических объектов, эффективное хранение данных и визуализацию результатов моделирования [1, 2]. Для обеспечения высокой гибкости, масштабируемости и отказоустойчивости систем мониторинга при построении программных комплексов целесообразно использовать современные решения на базе сервис-ориентированной архитектуры (Service Oriented Architecture — SOA) и технологий веб-сервисов.

Основу предлагаемой системы мониторинга составляют три компонента: управляющее приложение, сервисная шина и интеллектуальный интерфейс. Структура создаваемого на базе SOA комплекса программного обеспечения применительно к задаче мониторинга и упреждающего моделирования наводнений представлена на рисунке. Управляющее приложение предназначено для реализации логики работы системы мониторинга, которая сформирована в виде последовательности взаимосвязанных операций сбора, обработки и публикации данных. Сервисная шина — это программное ядро, хранящее информацию об имеющихся в системе сервисах. Под сервисами понимаются отдельные слабо связанные программные модули, реализующие такие технологические операции, как сбор данных, поступающих от внешних датчиков, тематическая обработка космического снимка, публикация векторной карты на геосервере и пр.

Особую роль в системе мониторинга и упреждающего моделирования наводнений играет сервис, представляющий собой интеллектуальный интерфейс к набору гидрологических моделей. Его основным предназначением является выбор конкретной модели расчета параметров,

характеризующих распространение воды, базирующийся на контекстной информации (точности исходных данных, динамике развития наводнения, требованиях к оперативности получения результата и т.д.). К настоящему моменту выполнены калибровка и верификация гидрологических моделей с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Основной информацией для калибровки и верификации модели послужили материалы экспедиционных изысканий, а также данные гидрологических наблюдений за период 1966—2013 гг. на ряде российских рек.



Предлагаемая сервис-ориентированная архитектура системы мониторинга и упреждающего прогнозирования наводнений и свойственная ей слабая связность программных модулей позволяет перевести разрабатываемую систему в формат „облачного“ приложения, реализуемого как сервис, посредством виртуализации ресурсов аппаратного обеспечения. Следствием перехода к облачным вычислениям является существенное повышение гибкости вариантов аппаратно-программной реализации. В частности, модули, реализующие алгоритмы мониторинга, прогнозирования и поддержки принятия решений, могут быть значительно распределены территориально и структурно, т.е. могут выполняться на вычислительных мощностях, не только находящихся в разных городах и странах, но и принадлежащих разным организациям

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (мероприятие 6.1.1), Университета ИТМО (субсидия 074-U01), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250, 13-06-00877, 13-07-12120-офи-м, 15-29-01294-офи-м, 15-07-08391, 15-08-08459), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект № 2.11), проектов ESTLA-TRUS: 1.2/ELRI-121/2011/13 — “Baltic ICT Platform”, 2.1/ELRI-184/2011/14 — “Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленцов В. А., Петухова Ю. Ю., Потрясаев С. А., Рогачев С. А. Технология оперативного автоматизированного прогнозирования разлива реки в период весенних паводков // Тем. вып. журн. „Труды СПИИРАН“: Технологии и примеры решения задач автоматизации и интеллектуализации процессов наземно-аэрокосмического мониторинга. 2013. Вып. 6(29). С. 40—57.
2. Samadzadegan F., Saber M., Zahmatkeshha H., Joze H., Ghazi Khanlou. An architecture for automated fire detection early warning system based on geoprocessing service composition // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (SMPR 2013), 5—8 Oct. 2013, Tehran, Iran. 2013. Vol. XL-1/W3. P. 351—355.

Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Зеленцов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
- Инна Николаевна Крыленко** — канд. геогр. наук; МГУ им. М. В. Ломоносова, кафедра гидрологии суши; E-mail: krylenko_i@mail.ru
- Илья Юрьевич Пиманов** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: pimen@list.ru
- Семен Алексеевич Потрысаев** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: spotryasaev@gmail.com
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: sokol@iias.spb.su
- Йосеф Ахтман** — канд. техн. наук; Федеральная политехническая школа Лозанны, лаборатория геоинженерии; E-mail: yosef.akhtman@epfl.ch

Рекомендована лабораторией информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН

Поступила в редакцию 20.02.15 г.

Ссылка для цитирования: Зеленцов В. А., Крыленко И. Н., Пиманов И. Ю., Потрысаев С. А., Соколов Б. В., Ахтман Й. Основы построения системы обработки данных дистанционного зондирования Земли на базе сервис-ориентированной архитектуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 3. С. 241—243.

PRINCIPLES OF EARTH REMOTE SENSING DATA PROCESSING SYSTEM DESIGN ON THE BASE OF SERVICE ORIENTED ARCHITECTURE

V. A. Zelentsov¹, I. N. Krylenko², I. Yu. Pimanov¹, S. A. Potryasaev¹, B. V. Sokolov¹, Yo. Akhtman³

¹ Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 199178, Saint Petersburg, Russia
E-mail: sokol@iias.spb.su

² Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia

³ Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, 1015, Lausanne, Switzerland

Principles of design of universal intelligent information system for Earth remote sensing data processing based on service oriented architecture are analyzed. An example of such a system application for operational flood forecasting is considered.

Keywords: remote sensing data, service oriented architecture, intelligent interface.

Data on authors

- Viacheslav A. Zelentsov** — Dr. Sci., Professor; SPIIRAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
- Inna N. Krylenko** — PhD; Lomonosov Moscow State University, Department of Land Hydrology; E-mail: krylenko_i@mail.ru
- Ilya Yu. Pimanov** — Post-Graduate Student; SPIIRAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: pimen@list.ru
- Semyon A. Potryasaev** — PhD; SPIIRAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: spotryasaev@gmail.com
- Boris V. Sokolov** — Dr. Sci., Professor; SPIIRAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; E-mail: sokol@iias.spb.su
- Yosef Akhtman** — PhD; Ecole Polytechnique Federal de Lausanne (EPFL), Laboratory of Geodetic Engineering; E-mail: yosef.akhtman@epfl.ch

Reference for citation: Zelentsov V. A., Krylenko I. N., Pimanov I. Yu., Potryasaev S. A., Sokolov B. V., Akhtman Yo. Principles of Earth remote sensing data processing system design on the base of service oriented architecture // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 3. P. 241—243 (in Russian)

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-3-241-243