

ISSN 1684-8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

5(66)/2013

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

К. Кристодолу,
д-р. наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария

Ю. Ф. Подоплекин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль
А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: А. Н. Колешко

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: www.i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2013

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

- Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара 2
Шакин О. В., Хансуваров Р. А., Колосков М. И. Методы инженерного расчета схемы электрического согласования акустооптического модулятора 9

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Аваряскин Д. П., Белоконов И. В.** Исследование проблемы безопасного полета наноспутников при их выведении на низкие орбиты 13
Фуртат И. Б. Алгоритм компенсации неизвестных мультигармонических возмущений для объектов с запаздыванием по управлению 19

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Мальцев Г. Н., Вознюк В. В., Туктамышев М. Р.** Моделирование конфликта сложных радиотехнических систем методом параллельных развивающихся стохастических процессов 26
Губочкин И. В., Карпов Н. В. Кластеризация авторегрессионных моделей речевых сигналов по критерию минимума информационного рас- согласования Кульбака — Лейблера 34

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

- Лукин М. А., Шальто А. А.** Разработка и автоматическая верификация параллельных автоматных программ 43
Сольницын Р. И., До Суан Чо. Программная реализация метеорологической поддержки замкнутой системы управления «Природа-техно- геника» 51
Скшидлевский А. А. Приложение для автоматизации процессов установки и запуска GNU/Linux-окружения на устройствах под управле- нием Android 56

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

- Волхонский В. В., Малышкин С. Л.** К вопросу единства терминологии в задачах физической защиты объектов 61

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

- Таубин Ф. А., Чуйков А. В.** Кодирование с неравной защитой компрес- сированного видео в беспроводных сетях 69

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

- Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Зиняков В. Ю.** Управление живуче- стью сложной системы на основе логико-вероятностного прогнозиро- вания 80

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Коршунов Г. И., Ли Шунь Минь.** Сокращение времени производствен- ного цикла морской транспортировки нефти на основе внедрения методов менеджмента и технологических инноваций 86
Колесников А. М., Сторошук А. Н. Методы оптимального распределе- ния ресурсов при реализации программ повышения устойчивости промышленного предприятия 93

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** Взвешенная конференц-матрица, обобщающая матрицу Белевича на 22-м порядке 97

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- 99

АННОТАЦИИ

104

Сдано в набор 17.09.13. Подписано в печать 28.10.13. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,8. Уч.-изд. л. 16,0. Тираж 1000 экз. Заказ 527.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 519.61:511-33

К ВОПРОСУ СУЩЕСТВОВАНИЯ МАТРИЦ МЕРСЕННА И АДАМАРА

Н. А. Балонин,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассматриваются условия существования матриц Мерсенна. На примере анализа условий существования матриц Белевича показано, что ограничения, характерные для целочисленных матриц, не сказываются на матрицах с рациональными и иррациональными значениями уровней, к которым принадлежат матрицы Мерсенна. Приводится зависимость значений уровней от порядка матрицы Мерсенна, показывается отсутствие особых точек на графике этой зависимости. Комментируется связь гипотез существования матриц Адамара и Мерсенна.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича, матрицы Мерсенна, М-матрицы, гипотеза существования.

Введение

Предпосылки доказательства существования матриц Мерсенна рассмотрены в работе [1] в связи с найденными матрицами 11-го и 19-го порядков, выходящих за пределы основной последовательности порядков $n = 2^k - 1$ [2].

Напомним, что матрица Мерсенна M_n [1] — это квадратная матрица порядка $n = 4k - 1$ с элементами $\{1, -b\}$ такая, что $M_n^T M_n = \mu I_n$. Здесь I_n —

единичная матрица; $\mu = \frac{(n+1) + (n-1)b^2}{2}$, причем

$$b = \frac{1}{2} \text{ при } n=3, \text{ в остальных случаях } b = \frac{q - \sqrt{4q}}{q-4},$$

где $q = n+1$. Количество элементов $-b$ в каждом столбце матрицы на единицу меньше количества единичных элементов.

Интерпретация теоремы Гилмана

Порядки $n = 4k - 1$ возникают в теории смежных с ними матриц Адамара [3]. В частности, из теоремы Гилмана [4] следует, что матрица Адамара порядка n существует, если $n-1$ — простое число.

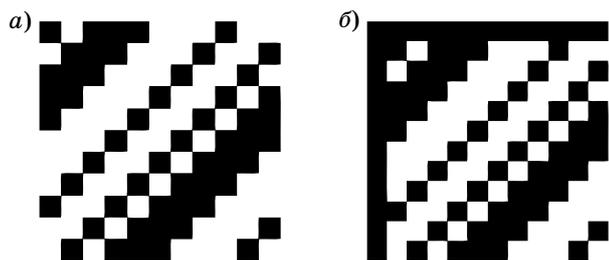
В приложении к матрицам Мерсенна теорема Гилмана звучит проще: матрица Мерсенна существует, если ее порядок — простое число.

В самом деле, для порядков 3, 7, 11, 19 матрицы Мерсенна существуют [1], причем матрица Адамара 12-го порядка (H_{12}) получается из матрицы M_{11} округлением ее отрицательных элементов до значения -1 с добавлением каймы в виде строки и столбца с отрицательными элементами для соблюдения баланса положительных и отрицательных элементов. Иллюстрацией сказанного является рис. 1, а, б, где черный цвет соответствует $-b$ (или -1), а белый — единице.

Обратим внимание: матрица M_{15} не удовлетворяет условию теоремы Гилмана, однако ее порядок принадлежит к последовательности $n = 2^k - 1$, для которой известен алгоритм построения матриц. Это означает, что теорема Гилмана касается не столько существования матриц Мерсенна и Адамара, сколько гарантии нахождения матриц некоторой относительно простой структуры. Портреты матриц отражают общую идею перехода от матриц Мерсенна к матрицам Адамара (и обратно).

Критерий существования матриц Белевича

Из матриц, на два порядка меньших матриц Адамара и тоже тесно связанных с ними, известны матрицы Белевича C_n [5] — квадратные ма-



■ Рис. 1. Портреты матриц Мерсенна M_{11} (а) и Адамара H_{12} (б)

трицы порядков n с элементами $\{1, -1\}$ и нулевой диагональю такие, что

$$C_n^T C_n = (n-1) I_n. \quad (*)$$

Известно, что они не существуют для значений $n-1$, не разложимых в сумму квадратов двух целых чисел.

Разберем подробнее доказательство этого утверждения.

Выражение (*) можно рассматривать в обратном порядке как условие разложения целочисленного для этих матриц весового коэффициента $w = n-1$ на суммы квадратов элементов вектор-столбцов матриц C_n . Про суммы квадратов известна теорема Лагранжа, из которой следует, что всякое целое число может быть представлено суммой четырех квадратов натуральных чисел [6]. Количество слагаемых в отмеченной сумме, в общем, избыточно и может быть сокращено без изменения значения весового коэффициента в правой части (*) итерационным удалением каймы матрицы, представляемой блочно в виде

$$C = \begin{pmatrix} A & B \\ G & D \end{pmatrix}.$$

Алгоритм Лагранжа. Выражение $C = D - G(A - W)^{-1}B$ описывает процедуру понижения порядка n матрицы удалением блоков A, B, G с коррекцией элементов блока D , где W — квазиортогональная матрица с тем же весом $W^T W = wI$.

От порядка матриц A, W зависит количество удаляемых на шаге алгоритма слагаемых. Невырожденность их разности $(A - W)$ с учетом свободы смены знака элементов строк и столбцов W обеспечивает, например, конструкция Вильямсона

$$W = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & w_4 \\ -w_2 & w_1 & -w_4 & w_3 \\ -w_3 & w_4 & w_1 & -w_2 \\ -w_4 & -w_3 & w_2 & w_1 \end{pmatrix}$$

с четырьмя коэффициентами, удовлетворяющими условию $w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2 = w$. Итерационное применение алгоритма понижения порядка n с сохранением веса w формально сводит его к порядку 2.

Пример. Этапы понижения порядка матрицы Белевича с 6-го до 2-го при выборе $w_1=2, w_2=1, w_3=0$ и $w_4=0$ отражены ниже. Для того чтобы не вводить новые обозначения, обозначим финальную матрицу как C_2 , хотя она выйдет из класса матриц с преимущественно единичными по норме коэффициентами:

$$C_6 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$C_6^T C_6 = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{pmatrix};$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}; \quad C_2^T C_2 = \begin{pmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 5 \end{pmatrix}.$$

Поскольку элементы матрицы Белевича исходно целочисленные, а инверсия $(A - W)$ базируется на операциях алгебраического сложения, умножения и деления чисел, то соблюдаемое на каждом шаге алгоритма постоянство значения w означает выражение числа $n-1$ суммой квадратов двух целых или, в общем, рациональных чисел. Для того чтобы разобраться, когда такое равенство возможно, необходимо напомнить следующие две теоремы.

Согласно *теореме Эйлера*, нечетное простое число представимо в виде суммы двух квадратов (целых чисел) тогда и только тогда, когда оно имеет вид $4k+1$. В иностранной литературе это утверждение часто называют рождественской теоремой Ферма, так как она стала известна из письма Пьера Ферма Марену Мерсенну, посланного 25 декабря 1640 года. Из этой теоремы выводится общее утверждение: натуральное число представимо в виде суммы двух квадратов (целых чисел) тогда и только тогда, когда любое простое число вида $4k+3$ входит в его разложение на простые множители в четной степени. Иногда

именно это утверждение считается *теоремой Эйлера — Ферма*.

Отсюда следует, что если сумма двух квадратов рациональных чисел равна целому числу, то оно разложимо и на сумму квадратов целых чисел. Применительно к рассматриваемой задаче это означает, что если значение $n - 1$ не разложимо на сумму двух квадратов, то матрицы, сводимой к матрице 2-го порядка, не существует. Это и есть формулировка необходимого критерия существования матриц Белевича. Если нет матриц Белевича, то невозможно построить матрицы Адамара, базирующиеся на них (детали комментировались в работах [5, 7] и некоторых других).

Применение алгоритма Лагранжа к матрицам Мерсенна

Алгоритм Лагранжа индифферентен к виду слагаемых — он может оперировать и с исходно иррациональными числами, гарантируя всего лишь то, что с ними будут производиться те же операции, что и в случае матриц Белевича. Тем самым весовой коэффициент μ матриц Мерсенна формально может быть сведен к сумме трех квадратов.

Пример. Последовательность приведения матрицы 7-го порядка к матрице 3-го порядка отражена ниже. Здесь $q = n + 1 = 8$; $b = \frac{q - \sqrt{4q}}{q - 4} \cong 0,586$;
 $\mu = \frac{(n + 1) + (n - 1)b^2}{2} \cong 5,029$; $w_1 = \sqrt{\mu}$; $w_2 = 0$; $w_3 = 0$;
 $w_4 = 0$.

$$M_7 = \begin{pmatrix} 1 & -b & -b & -b & 1 & 1 & 1 \\ -b & 1 & -b & 1 & 1 & -b & 1 \\ -b & -b & 1 & 1 & -b & 1 & 1 \\ -b & 1 & 1 & -b & 1 & 1 & -b \\ 1 & 1 & -b & 1 & -b & -b & -b \\ 1 & -b & 1 & 1 & 1 & -b & -b \\ 1 & 1 & 1 & -b & -b & -b & 1 \end{pmatrix};$$

$$M_7^T M_7 = \begin{pmatrix} \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix};$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} 2,243 & 0 & 0 \\ 0 & 2,243 & 0 \\ 0 & 0 & 2,243 \end{pmatrix}; \quad M_3^T M_3 = \begin{pmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}.$$

Известно, что целое число разложимо на сумму трех квадратов, если оно не принадлежит к виду $4^m(8k + 7)$. Столь подробный анализ, впрочем, излишен — случаи, когда значение элемента b матрицы не приводимо к рациональному виду, установить проще, поскольку для его вычисления получена прямая формула. Соответственно, применение алгоритма Лагранжа к матрицам Мерсенна, в отличие от предыдущего случая, не вскрывает наличия противоречия, которое не позволило бы им существовать.

Отсутствие особых точек на графике уровня элементов

Начиная с теоремы Гилмана и некоторых других, сходных, анализ возможности существования матриц Адамара нередко подменяется вопросом об области применимости того или иного алгоритма их построения или существования какой-либо особой их разновидности. Такая постановка не совсем правомерна. Так, например, вопрос о существовании корней полиномов был решен положительно (при изменении области их определения с вещественной оси на комплексную плоскость), в то же время, как известно, общей формулы для нахождения корней полиномов высоких порядков нет.

В отличие от целочисленных матриц Адамара и Белевича, матрицы Мерсенна определены на более широком классе: когда вариант рациональных значений их коэффициентов невозможен (как у матриц Белевича), он восполняется решением с иррациональными числами. Зависимость коэффициентов b матриц Мерсенна от порядка n не содержит особых точек, свидетельствующих об отсутствии матриц (рис. 2).

В случае, когда придется констатировать отсутствие существования матриц Мерсенна, возникнет вопрос о том, что же тогда, согласно этой зависимости, вычислялось? В теме существования матриц Мерсенна довольно много такого рода нюансов. Можно и так рассуждать: решения ли-

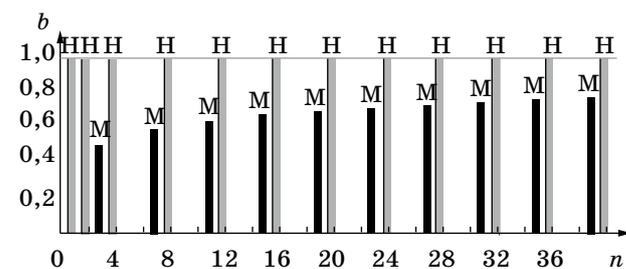


Рис. 2. Зависимость уровней матриц Мерсенна М и Адамара Н от порядка n

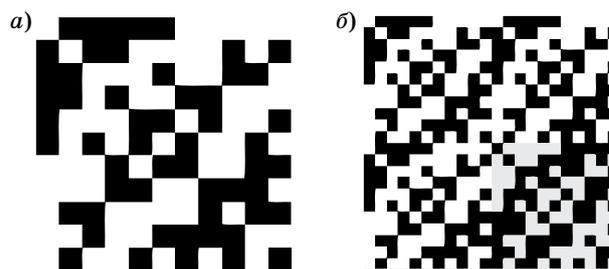
нейных дифференциальных уравнений, например, имеют ограниченное количество особенностей, в силу чего их параметры можно найти, располагая конечным числом точек интегральной кривой (а не всей кривой). Если матрицы Мерсенна, вопреки зависимости $b(n)$ (см. рис. 2), не существуют, придется объяснять характер причудливой избирательности, для проявления которой в постановке иной, независимой задачи, как видится, нет оснований.

В самом деле, помимо определения матриц Мерсенна заданием вида правой части выражения (*), существует оптимизационный подход, при котором матрицы Мерсенна определяются как частные случаи минимаксных М-матриц [8, 9]. Оба этих независимых между собой подхода приводят к одинаковому результату в отношении формулы для нахождения модуля их уровня b , но во втором случае вид правой части (*) является предметом поиска, т. е. свободен. Решение следует из соблюдения условий ортогональности, а широкая область определения матриц создает предпосылки для разрешимости. Если бы задача изначально не рассматривалась как чисто комбинаторная, то, возможно, соображения по существованию необходимых ортогональных базисов появились бы раньше, поскольку для ортогональных матриц с любым значением элементов задача не является сколь-нибудь выделенной.

Семейство матриц Адамара

Рассматриваемый выше анализ поднимает более глубокий вопрос о принадлежности квазиортогональных матриц к семейству, частными проявлениями которого являются матрицы Адамара [3], Мерсенна [1, 2], Эйлера [10] и Ферма [11]. Матрицы перечислены в последовательности убывания переменной d в значении порядка $n = 4k - d$, где $d = 0, 1, 2, 3$. Случай $d = 0$ (матрицы Адамара) известен в научной литературе достаточно давно, и для него получен ряд алгоритмов, например, Скарпи [12], Пэли [13] и др. Случаи матриц нечетных порядков, а также некоторых четных изучены недостаточно полно.

При понижении значения порядка ортогональность столбцов матрицы достигается увеличением количества уровней — значений, которым равны элементы матрицы (или их модули). Матрицы Адамара — одноуровневые по модулям элементов матрицы, матрицы Мерсенна — двухуровневые, матрицы Эйлера — четырехуровневые (с учетом знака) матрицы. Порядки $n = 4k - 3$ исследованы менее всего, для них известна последовательность матриц Адамара — Ферма [11]. Матрицы эти расположены ближе к матрицам Адамара на единицу меньших порядков $n - 1$ и



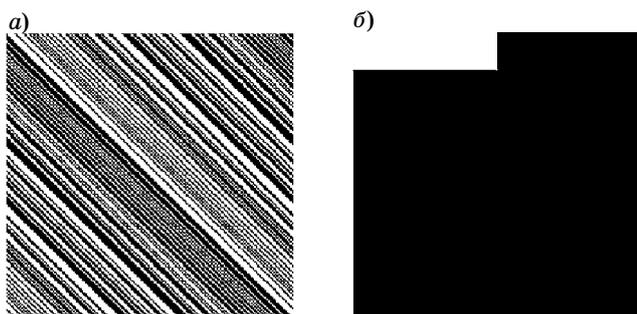
■ Рис. 3. Портреты матриц M_{11} (а) и E_{22} (б)

наследуют от них всего лишь трехуровневую структуру. Вне пределов основной зависимости такого вида матриц нет. Можно предположить, что есть и другие виды матриц на этих порядках, тяготеющие к матрицам Эйлера.

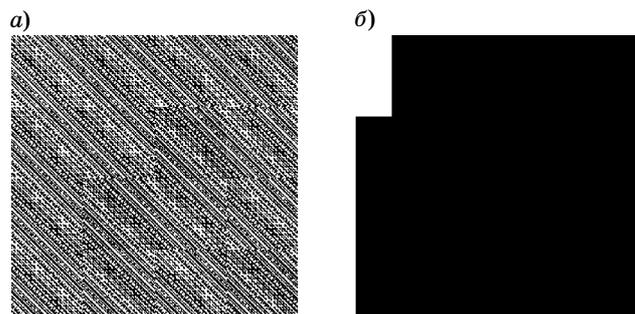
Матрица Эйлера 22-го порядка (E_{22}), невозможного для матриц Белевича (число 21 не разлагается на сумму двух квадратов), напротив, существует, так как она получается из матрицы M_{11} (рис. 3, а, б) простым применением алгоритма Сильвестра [1]. Это значит, что существуют связанные с ней матрицы M_{23} и H_{24} . Об отложенной для матриц H_{44} проблеме, как в случае с симметричными матрицами Белевича, это также не свидетельствует, поскольку есть связанная с ней матрица M_{43} . Таким образом, матрицы Белевича порядков $n = 4k - 2$ принадлежат не к слою, а к побочной ветви матриц, из которых матрицы Адамара удвоенного порядка иногда строятся, иногда нет. На критическом $n = 22$ экстремальное значение детерминанта на классе квазиортогональных матриц достигается не на них, а на иных структурах [14, 15].

Для известных в теории матриц Адамара случаев, когда не находится алгоритм построения (отличный от переборного), матрицы Мерсенна существуют; в частности, это касается матрицы M_{91} , соответствующей первой найденной перебором на компьютере матрице H_{92} , ее невозможно построить методом Пэли [13]. Помимо Пэли, и как раз в связи с недостатками его подхода, блочное построение матриц Адамара исследовано Вильямсоном [6]. Поскольку, согласно алгоритму Лагранжа, их можно находить при помощи конструкции W , он предложил заменить в ней четыре скалярных коэффициента четырьмя попарно-коммутируемыми симметричными матрицами вчетверо меньших, чем у матриц Адамара, порядков.

Возникающая отсюда комбинаторная задача по перебору целочисленных элементов блочных матриц Вильямсона трудоемка и не всегда может быть решена существующими средствами. В таких случаях стоит задуматься о приближениях, поскольку каков бы ни был порядок следующей



■ Рис. 4. Портрет матрицы M_{167} и гистограмма модулей ее элементов



■ Рис. 5. Портрет матрицы приближения к H_{668} и гистограмма модулей ее элементов

найденной перебором матрицы, проблема этим только отодвигается. Об этом материал следующего раздела.

Приближение матриц Адамара матрицами Мерсенна

Случаи, для которых производительность современных вычислительных машин не позволяет пока вычислить матрицы Адамара методом Вильямсона, достаточно хорошо известны — это порядки 668, 716, 892, 1004, 1132, 1244, 1388, 1436, 1676, 1772, 1916, 1948, 1964 и т. п. [16]. Заметим, что вчетверо меньшие значения порядков — это порядки матриц Мерсенна. Так как матрицы Адамара относительно небольших порядков давно изучены, это открывает определенные перспективы для их применения трансформацией их в матрицы Мерсенна.

Например, в качестве четырех матриц Вильямсона возьмем первую из них — матрицу Мерсенна (или Эйлера), а остальные три — ее же, но с округленными до значений $\{1, -1\}$ коэффициентами. Так как остается одна степень свободы влиять на ортогональность столбцов полученной таким способом матрицы учетверенного порядка (выбором значения варьируемого коэффициента b неокругленной матрицы), оказывается, что этот метод позволяет находить квазиортогональные матрицы без характерного для метода Вильямсона перебора: совместность гарантируется структурой.

Стартовые матрицы M_3 и E_6 переходят сразу в матрицы H_{12} и H_{24} .

В общем случае зависимость $b(n)$ имеет особую точку — $n=44$ (для матриц Мерсенна) и $n=88$ (для матриц Эйлера), где она меняет свой знак. Для порядков, меньших, чем отмеченные особо, матрицы Адамара можно найти примерно так же, как это делается в методе Пэли с матрицами Белевича — доопределением модулей элементов до единицы и сменой знака части элементов.

Матрицы более высоких порядков проще оставлять такими, каковы они есть, что существенно

упрощает алгоритм исключением наиболее трудоемкой операции — перебора. Например, матрица Мерсенна относительно малого 167-го порядка, судя по гистограмме ее уровней, немногим отличается уже от матрицы Адамара (рис. 4, а, б).

При использовании M_{167} в конструкции Вильямсона коэффициент b , характеризующий приближение к матрице H_{668} , составляет около 70 % от максимально возможного уровня, и элементов с уровнем, отличным от единицы, становится заметно меньше в относительном соотношении (рис. 5, а, б). У остальных матриц перечисленных выше порядков он еще больше — приближается к единице с ростом n .

Использование матриц Вильямсона с матрицами Мерсенна, разумеется, не единственное приложение матриц Мерсенна. Везде, где возникают их характерные порядки, уверенно можно полагать, что они принимают в расчетах действительное участие. Так, например, при вычислении матрицы Адамара порядка $(n-1)n$ по матрице Адамара порядка n (метод Скарпи [12]) фигурирует размерность матриц Мерсенна. Этот метод значительно проще интерпретируется как вставка матрицы Мерсенна в саму себя с каймой у блочных матриц, равной по знаку значению вытесняемого и округляемого до единицы элемента. Так как в оригинальном методе нет элементов b , столь простая формулировка и сам взгляд на решение как специфическое квадрирование матриц Мерсенна, а не матриц Адамара, в нем невозможны.

Данный подход позволяет находить матрицы, недостижимые методом Пэли [13]. Кроме того, он указывает на характер замены известного кронекерова произведения матриц Адамара при переходе к матрицам Мерсенна.

Исследование слоев матриц, т. е. матриц, заданных для характерных им порядков функциями уровней, помимо достижения более полного понимания проблемы, позволяет находить оригинальные неизвестные ранее методы вычисления матриц Адамара или новых их приближений

с помощью нецелочисленных матриц Мерсенна. Для ряда приложений квазиортогональных матриц к помехоустойчивому кодированию информации и маскированию изображений целочисленные значения их элементов далеко не столь важны, как важна высокая размерность решаемой задачи и наличие экстремальных качеств [8], которыми обладают матрицы Адамара и все близкие к ним матрицы их семейства.

Заключение

В настоящей работе исследованы условия существования предложенных авторами матриц Мерсенна. На примере анализа условий существования матриц Белевича показано, что ограничения, характерные для этих целочисленных матриц, не сказываются на матрицах с рациональными и, в общем, иррациональными значениями уровней, к которым принадлежат матрицы Мерсенна. Вместе с тем нецелочисленные коэффициенты матриц Мерсенна не мешают искать впоследствии целочисленную матрицу Адамара, поскольку от иррациональной матрицы наследуется только ее структура.

Перспектива решения проблемы Адамара длительное время связывалась с успешностью комбинаторных алгоритмов их нахождения. Никакой частный алгоритм, разумеется, не способен эту очевидно большую задачу — поиска матриц Адамара любого порядка — решить. Если принять во внимание преемственность слоев семейства матриц, включающих и матрицы Адамара, то, учитывая их связанность, возможна общая схема доказательства факта существования всех таких матриц. Она не обязывает уметь находить сами матрицы, а опирается на возможность указать функции, описывающие их уровни. Причем эти функции не имеют особых точек, свидетельствующих о неопределенности. Принадлежность матриц к слою и наличие одного или более слоев расценивается, как раз, по наличию функций уровней, описывающих слой.

Матрицы Мерсенна предпочтительнее матриц Адамара потому, что они занимают в тетраде матриц Адамара, Мерсенна, Эйлера, Ферма наиболее удаленное положение от матриц порядка $4k-3$, на котором наблюдается отсутствие явно

выделенного и проходящего по всем порядкам матриц слоя. Справа и слева (по порядкам) от матриц Мерсенна находятся связанные с ними взаимно-однозначным соответствием матрицы Адамара и Эйлера. Компромиссное (не целое) значение уровня b отличает этот слой от слоя родственных им матриц Адамара. На порядках матриц Ферма решение, согласно общей логике построения этих матриц, связано с образованием дополнительных уровней, — это не параметрическое, а более сложное структурное изменение матрицы.

Хотя множества матриц в соседствующих слоях равновелики по количеству их представительниц, исследовать условия разрешимости задачи проще на порядках $4k-1$, делая соответствующие выводы в отношении побочных представительниц. Роль особых точек в зависимости $b(n)$ подчеркивается еще тем, что для конструкций Вильямсона, например, особые точки связаны с принципиальной возможностью или невозможностью с их помощью находить матрицы Адамара. Это некоторая дополнительная информация, которая отсутствует в альтернативном подходе.

О влиянии иррациональных чисел на разрешимость проблемы нахождения матриц Белевича, а значит, и матриц Адамара, известно давно. Стоит отметить, что основной и оригинальный результат Пэли связан с примером построения символов Лежандра для конечного поля $FG(9)$ с иррациональными значениями элементов, поскольку 9 — не простое число. Матрица Белевича 10-го порядка имеет вложенные структуры, в которых несложно идентифицируются матрицы Мерсенна 3-го порядка. С помощью матриц нечетного порядка эта задача (и сходные) решается, возможно, менее элегантно, без привлечения теории конечных полей, но методически более просто.

В том случае, когда матрица Мерсенна найдена, она непосредственно приводит к матрице Адамара на единицу большего порядка. Таким образом, гипотезы о существовании матриц некоторых четных (впервые предположение высказал, скорее всего, не Адамар, а Пэли, комментируя ограниченность алгоритмов, впоследствии используемых в теории матриц Белевича) [13] и нечетных значений порядков [1] взаимно связаны, обнаруживают родство при поисках доказательства и дополняют друг друга.

Литература

1. Балонин Н. А. О существовании матриц Мерсенна 11-го и 19-го порядков // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 89–90.

2. Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А. Вычисление матриц Адамара — Мерсенна // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5. С. 92–94.
3. Hadamard J. Résolution d'une question relative aux déterminants // Bulletin des Sciences Mathématiques. 1893. Vol. 17. P. 240–246.

4. **Gilman R. E.** On the Hadamard determinant theorem and orthogonal determinants // Bull. Amer. Math. Soc. 1931. Vol. 37. P. 30–31.
5. **Belevitch V.** Theorem of 2n-terminal networks with application to conference telephony // Electr. Commun. 1950. Vol. 26. P. 231–244.
6. **Williamson J.** Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares // Duke Math. J. 1944. Vol. 11. P. 65–81.
7. **Van Lint J. H., Seidel J. J.** Equilateral point sets in elliptic geometry // Indagationes Mathematicae. 1966. Vol. 28. P. 335–348.
8. **Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** М-матрицы // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 14–21.
9. **Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б.** Алгоритм и программа поиска и исследования М-матриц // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3. С. 82–86.
10. **Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** О двух способах построения матриц Адамара — Эйлера // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 7–10.
11. **Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Мироновский Л. А.** Вычисление матриц Адамара — Ферма // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. С. 90–93.
12. **Scarpis U.** Sui determinanti di valore Massimo // Rendiconti della R. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere. 1898: 31. P. 1441–1446.
13. **Paley R. E. A. C.** On orthogonal matrices // J. of Mathematics and Physics. 1933. Vol. 12. P. 311–320.
14. **Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б.** М-матрица 22-го порядка // Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 87–90.
15. **Балонин Н. А., Сергеев М. Б.** Взвешенная конференц-матрица, обобщающая матрицу Белевича на 22-м порядке // Информационно-управляющие системы. 2013. № 5. С. 97–98.
16. **Shalom Eliahou.** La conjecture de Hadamard (I) — Images des Mathématiques // CNRS. 2012. <http://images.math.cnrs.fr/La-conjecture-de-Hadamard-I.html> (дата обращения: 15.08.2013).

Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2010 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>) и на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2010 гг. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4200 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: krasnodar@interpochta.ru

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru, сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru, сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.

УДК 535.241.13:534

МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОГЛАСОВАНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА

О. В. Шакин,

доктор техн. наук, профессор

Р. А. Хансуваров,

ассистент

М. И. Колосков,

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Представлена методика расчетов параметров элементов акустооптического модулятора. С ее помощью рассчитаны электрооптическая частотная характеристика акустооптического модулятора, параметры электрической эквивалентной схемы пьезопреобразователя по методу Фано, определены геометрические размеры электрода пьезопреобразователя. Приведены расчеты амплитудно-частотной характеристики согласующей цепи, частотной характеристики изотропного акустооптического взаимодействия и затухания акустической волны в светозвукопроводе. Эти величины используются в расчете электрооптической частотной характеристики акустооптического модулятора. При его разработке параметры указанной характеристики являются одним из основных требований.

Ключевые слова — акустооптический модулятор, электрооптическая частотная характеристика, схема согласования, пьезопреобразователь.

Введение

Особенностью предлагаемой методики расчета схемы согласования акустооптического модулятора (АОМ) является предположение об отсутствии искажений в акустооптической ячейке, работающей на линейном участке модуляционной характеристики АОМ. Данная методика расчета включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор материалов светозвукопровода и пьезопреобразователя (ПП);
- 2) определение параметров электрической эквивалентной схемы ПП;
- 3) определение размеров верхнего электрода ПП;
- 4) расчет электрической цепи, согласующей ПП с генератором электрического сигнала;
- 5) расчет электрооптических характеристик [1].

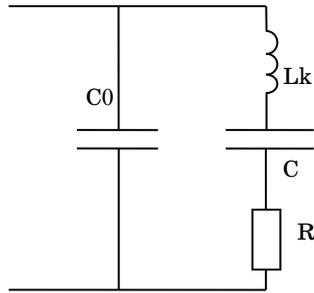
Описание метода расчета

Для расчета схемы согласования для пьезопреобразователя LiNbO_4 и светозвукопровода TeO_2 выбраны следующие исходные данные:

- 1) длительность обрабатываемого сигнала $T = 3$ мкс;
 - 2) среднеарифметическая частота рабочего диапазона $f_0 = 300$ МГц;
 - 3) относительная полоса рабочих частот $\Delta\Omega = 0,333$;
 - 4) уровень неравномерности электрооптической частотной характеристики $\Delta\alpha = 0,1$;
 - 5) длина волны лазерного излучения $\lambda = 632$ нм;
 - 6) мощность генератора сигнала в согласованной нагрузке $P_0 = 100$ мкВт;
 - 7) выходное сопротивление генератора $R_r = 50$ Ом.
- Вид и элементы электрической эквивалентной схемы электроакустического преобразователя на основе пьезоэлектрической пластины представлены на рис. 1.

Определение параметров электрической эквивалентной схемы ПП сводится к определению безразмерного коэффициента электрической связи k и добротности Q последовательного $L_k CR$ -контура:

$$k = \frac{C}{C_0} = 0,2; Q = 4; k = \frac{k_{\text{ЭМ}}^2}{1 - k_{\text{ЭМ}}^2},$$



■ **Рис. 1.** Электрическая эквивалентная схема пьезопреобразователя АОМ

где C — динамическая емкость последовательно-го $L_k CR$ -контура; C_0 — статическая емкость последовательного $L_k CR$ -контура; $k_{эм}$ — коэффициент электромеханической связи.

Если волновые акустические сопротивления ПП и акустического связующего слоя близки по величине, а диссипативные потери в ПП и в акустическом связующем слое малы, то при расчете добротности можно воспользоваться приближенной формулой

$$Q = \frac{\pi W_{PT}}{2W_{BL}},$$

где W_{PT} — волновое акустическое сопротивление ПП; W_{BL} — волновое акустическое сопротивление светозвукопровода.

Частотную характеристику электрооптической эффективности АОМ [2] можно записать в виде

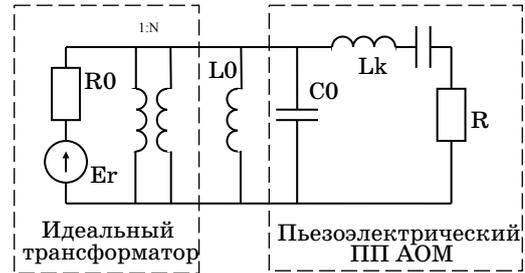
$$K_d = K_a k_1 k_2 k_3 k_4,$$

где K_a — акустооптическая эффективность; k_1 — частотная зависимость энергетической эффективности преобразующей электрической цепи, согласующей ПП с источником управляющего сигнала; k_2 — частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная механизмом акустооптического взаимодействия; k_3 — частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в светозвукопроводе; k_4 — частотная зависимость диссипативных потерь в электроакустическом преобразователе и элементах узла его электрического возбуждения.

Частотная зависимость преобразования согласующей цепи

$$k_1 = \frac{P_{\Pi}}{P_0} = 1 - |\Gamma|^2,$$

где P_{Π} — электрическая мощность, поглощаемая входом электрической согласующей цепи; P_0 — мощность управляемого сигнала.



■ **Рис. 2.** Полосовая двухзвенная согласующая цепь

Для полосовой двухзвенной согласующей цепи, оптимальной по методу Фано, без учета диссипативных потерь (рис. 2), модуль коэффициента отражения имеет вид

$$|\Gamma|^2 = \frac{\left(Q\sqrt{k} - 1 - (a)^2 Q^2 \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2 + (a)^2 Q^2 \left(1 - \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2}{\left(Q\sqrt{k} + 1 - (a)^2 Q^2 \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2 + (a)^2 Q^2 \left(1 + \frac{1}{Q\sqrt{k}} \right)^2},$$

$$a = \Omega - \frac{1}{\Omega},$$

где $\Omega = \Delta f / f_0$ — относительная частота. Зависимость $k_1(\Omega)$ показана на рис. 3, линия 1.

Частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная механизмом акустооптического взаимодействия, рассчитывается по формуле

$$k_2(f) = \left(\frac{\sin\left(0,25Q_{KK}\left(P^2\Omega^2 - P\Omega\right)\right)}{0,25Q_{KK}\left(P^2\Omega^2 - P\Omega\right)} \right)^2,$$

где Q_{KK} — параметр Клейна — Кука; $P = f_B / f_0 = 1$ — относительная расстройка среднегеометрической частоты характеристики $k_1(f)$ по отношению к частоте Брэгга;

$$f_B = 2n \sin\left(\frac{\theta_B}{\lambda}\right) = 3 \cdot 10^8 \text{ Гц.}$$

Здесь $n = 12$ — показатель преломления светозвукопровода; угол Брэгга $\theta_B = 0,02257$.

Зависимость $k_2(f)$ показана на рис. 3, линия 2.

Частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в светозвукопроводе, рассчитывается по формуле

$$k_3 = \frac{1 - \exp(-x_0 \Omega^2)}{x_0 \Omega^2}; \quad x_0 = 2\alpha_0 v_{зв} T f_0^2,$$



■ **Рис. 3.** Частотная зависимость преобразования согласующей цепи; акустооптической эффективности; акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в светозвукопроводе

где α_0 — коэффициент затухания акустической волны; $v_{зв}$ — скорость акустической волны в светозвукопроводе.

Зависимость $k_3(f)$ показана на рис. 3, линия 3.

Потери в электроакустическом тракте малы. Поэтому можно считать, что мощность, поглощаемая согласующей цепью, равна мощности излучаемой ($P_{п} = P_{а}$). В этом случае $k_4(f) = P_{п}/P_{а} = 1$.

Электрооптическая частотная характеристика (ЭОЧХ) АОМ записывается в виде

$$K_d(k, Q, x_0, Q_{КК}, P, f) = A Q_{КК} k_1(k, Q, f) k_2(Q_{КК}, f, P) k_3(k, Q, f) k_4(f);$$

$$A = \frac{\pi M_2 n_0^2 \lambda_B^2}{4 h \lambda^3 \cos^2(\theta_B)} = 356,701;$$

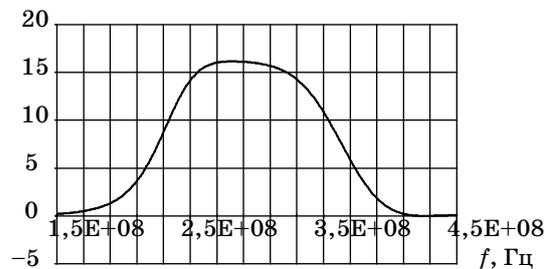
$$Q_{КК} = \frac{2\pi \lambda L}{n_0^2 \lambda_B^2} = 21,0258,$$

где A — параметр взаимодействия; M_2 — акустооптическая добротность среды светозвукопровода; n_0 — показатель преломления светозвукопровода; λ_B — длина акустической волны, при которой углы падающей и дифрагировавшей оптических волн относительно нормали к фронту акустической волны равны; h — поперечный размер внешнего электрода; λ — длина волны лазерного пучка в вакууме; L — продольный размер электрода.

Нормированная ЭОЧХ рассчитывается как

$$K'_d(k, Q, x_0, Q_{КК}, P, f) = \frac{K_d(k, Q, x_0, Q_{КК}, P, f)}{A P_0} = Q_{КК} k_1(k, Q, f) k_2(Q_{КК}, f, P).$$

Параметры k, Q, x_0 определяются физически параметрами кристалла, а $Q_{КК}$ и P — управляемые параметры, с помощью которых можно получить заданный вид ЭОЧХ.



■ **Рис. 4.** Нормированная ЭОЧХ акустооптического модулятора

Нормированная частотная характеристика показана на рис. 4.

Характеристики на рис. 3 и 4 хорошо согласуются с расчетом, представленным в работе [3].

Длина акустооптического взаимодействия

$$L = \frac{Q_{КК} n v_{зв}^2}{2\pi \lambda f_B^2} = 2,076 \text{ мм.}$$

Электрод был выбран [3] прямоугольной формы. Длина поперечного сечения пьезоэлектрической пластины

$$H = \sqrt{\frac{2v_{зв}^2 \cdot T}{f_H}},$$

где f_H — нижняя граничная частота:

$$f_H = -\Delta f + \sqrt{f_0^2 + \Delta f^2}.$$

Длина поперечного сечения H в работе [3] указана и равна 2,5 мм. Статическая емкость

$$C_0 = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{t} = 46,279 \text{ пФ};$$

$$S = LH; \quad t = \frac{v_{зв}}{2f_0} = 7 \text{ мкм,}$$

где $\varepsilon=36,6$ — диэлектрическая проницаемость ПП; $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S — площадь электрода; $t=7$ мкм — толщина ПП.

Сопротивление излучения ПП рассчитывается как

$$R = \frac{1}{\omega_0 C_0 k Q} = 14,3312 \text{ Ом.}$$

Величина индуктивности, параллельной ПП:

$$L_0 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_0^2} = 6,082 \text{ нГн.}$$

Таким образом, были рассчитаны электрические и геометрические параметры ПП и нормированная ЭОЧХ АОМ, которая является одной из главных характеристик, определяющих его качество.

Заключение

Предлагаемая методика позволяет рассчитать ЭОЧХ АОМ и геометрические размеры электродов пьезоэлемента. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетом, показанным в рабо-

те [3]. Данная методика годится для расчета ЭОЧХ АОМ как в режиме Брэгга, так и в режиме Рамана — Ната.

Особенностью представленной методики является предположение об отсутствии искажений в акустооптической ячейке, работающей на линейном участке модуляционной характеристики АОМ.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.527.12.0019.

Литература

1. Данилов В. В. Инженерный расчет акустооптического модулятора // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 2–3. С. 16–21.
2. Гусев О. Б. Методика расчета основных элементов и технических характеристик электроакустооптического тракта акустооптических модуляторов: метод. указ. / ЛИАП. – Л., 1984. – 18 с.
3. Design and fabrication of acousto-optic devices / Ed. Akis P. Goutzoulis, Dennis R. Pape, Sergei V. Kulakov. – N. Y.: University of Rochester, 1994. – 497 p.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несет рекламодатели.

УДК 629.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОГО ПОЛЕТА НАНОСПУТНИКОВ ПРИ ИХ ВЫВЕДЕНИИ НА НИЗКИЕ ОРБИТЫ

Д. П. Аваряскин,

аспирант

И. В. Белоконов,

доктор техн. наук, профессор

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Верхние ступени ракет-носителей могут быть использованы для попутного запуска наноспутников. Решение поставленной задачи позволит обосновать возможность безопасного отделения наноспутников. В силу того, что после отделения основной полезной нагрузки орбитальная ступень приобретает угловую скорость, величина и направление которой заранее неизвестны, проведено стохастическое исследование, которое позволило разработать методику выбора параметров управления отделением (величину скорости и время отделения наноспутника), исключающих возможность возникновения соударения при последующем движении. Численные результаты приводятся для запуска с верхней ступени ракеты-носителя «Союз».

Ключевые слова — наноспутник, орбитальная ступень, ракета-носитель, полезная нагрузка, безопасное движение.

Введение

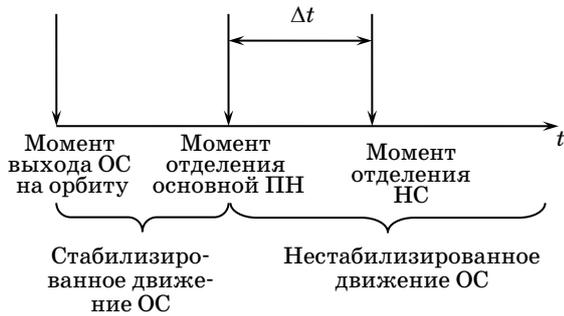
В настоящее время многие отечественные и зарубежные инновационные компании и университеты активно занимаются разработкой и созданием научно-образовательных наноспутников (НС). Такие спутники приобрели популярность благодаря тому, что их создание не требует значительных финансовых затрат, однако позволяет испытать в условиях космического пространства перспективные миниатюрные датчики и элементы бортовых систем, оригинальные технические решения прежде, чем их можно применять в дорогостоящих проектах космических аппаратов. Кроме того, участие молодежи в разработке и создании НС предоставляет уникальную возможность обучения студентов космическим технологиям на примере реального проекта. Однако вывод на орбиты и проведение летных испытаний являются большой проблемой, которая в основном решается попутным запуском с основной полезной нагрузкой (ПН). Попутный запуск существенно снижает финансовые затраты, а для его осуществления требуется создание устройства для отделения НС и выбор места его размещения.

Как правило, каждая ракета-носитель (РН) имеет резерв по массе выведения. В работе [1] было предложено использовать для этих целей отсек перехода от верхней ступени к головному обтекателю применительно к РН «Союз».

Верхние ступени РН обычно выводятся на околокруговую низкую орбиту, например, для орбитальной ступени (ОС) РН «Союз» геометрия орбиты составляет 190×240 км ($e=0,0038$), а для РН «Протон-М» — 170×230 км ($e=0,0046$) [2].

При отделении НС на таких орбитах время существования будет малым, однако для проведения кратковременных экспериментов (несколько суток) этого бывает достаточно. Так как на таких орбитах влияние атмосферы на движение значительно, а НС, основная ПН и ОС имеют разные баллистические коэффициенты, то существует опасность их столкновения.

Временная диаграмма процесса отделения основной ПН и НС представлена на рис. 1. Задержка по времени отделения НС (Δt) является самым важным параметром рассматриваемой задачи, так как в силу возникновения неконтролируемого движения ОС ориентация ее продольной оси будет неизвестна (соответственно, направление



■ **Рис. 1.** Временная диаграмма процесса отделения основной ПН и НС

отделения НС также будет заранее неопределенным).

В связи с этим возникает вопрос о выборе параметров отделения НС (скорости и времени отделения) из условия недопущения его столкновения с ОС и основной ПН.

В настоящее время неизвестен характер поведения ОС после отделения основной ПН, так как не предполагалось их дальнейшее использование. Так, например, для ОС РН «Союз» было проведено имитационное численное моделирование, которое позволило определить диапазон угловых скоростей в связанной системе координат, которые она приобретает после отделения основной ПН [3]:

$$\begin{aligned} \omega_x &= -(2,5 \pm 0,3) \text{ }^\circ/\text{с}; \\ \omega_y &= (0,0 \pm 2,5) \text{ }^\circ/\text{с}; \\ \omega_z &= (0,0 \pm 2,5) \text{ }^\circ/\text{с}. \end{aligned}$$

Случайный характер возникающего прецессионного движения, большой диапазон разброса проекций угловой скорости актуализирует проблему выбора параметров безопасного отделения НС, так как с учетом закономерности близкого относительного движения и влияния атмосферы возможно столкновение как с ОС, так и с отделяемой ПН.

Математическое описание относительного движения

Для исследования использовалась математическая модель относительного движения в орбитальной системе координат [4]:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\dot{\theta}\dot{y} + \ddot{\theta}y - \dot{\theta}^2x + \frac{\mu}{R_0^3}x = P_x \\ \ddot{y} - 2\dot{\theta}\dot{x} - \ddot{\theta}x - \dot{\theta}^2y - \frac{\mu}{R^2} + \frac{\mu}{R_0^3}(y + R) = 0, \\ \ddot{z} + \frac{\mu}{R_0^3}z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где x, y, z — координаты НС относительно ОС в орбитальной системе координат;

$\mu = 398\,602 \text{ км}^3/\text{с}^2$ — гравитационный параметр Земли;

$\dot{\theta} = \frac{\sqrt{\mu p}}{R^2}$ — выражение производной угла истинной аномалии;

т.е. истинной аномалии;

$\ddot{\theta} = -2e\sqrt{\frac{\mu}{p^3}} \cdot \dot{\theta} \sin \theta$ — выражение второй производной угла истинной аномалии;

θ — угол истинной аномалии ОС (текущее положение на орбите);

$R_0 = [x^2 + (R+y)^2 + z^2]^{1/2}$ — радиус-вектор НС;

$R = p/(1 + e \cdot \cos \theta)$ — радиус-вектор ОС;

p — фокальный параметр орбиты;

e — эксцентриситет орбиты;

$P_x = a^{OC} - a^{\sin}$ — проекция аэродинамического ускорения;

$a^{НС} = S_b^{НС} \rho V^2$ — аэродинамическое ускорение НС;

$a^{ОС} = S_b^{ОС} \rho V^2$ — аэродинамическое ускорение ОС;

$\Delta Q = S_b^{ОС} - S_b^{НС}$ — разность баллистических коэффициентов ОС и НС;

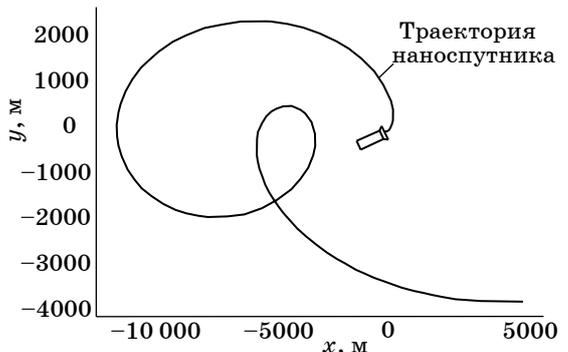
$S_b^{ОС}$ — баллистический коэффициент ОС;

$S_b^{НС}$ — баллистический коэффициент НС;

ρ — плотность атмосферы;

V — скорость набегающего потока.

Данная модель описывает движение НС или основной ПН относительно ОС, двигающейся по эллиптической орбите, в орбитальной системе координат (рис. 2), начало которой находится в центре масс ОС, ось Ox направлена по вектору орбитальной скорости, ось Oy направлена по радиусу-вектору ОС, ось Oz дополняет систему до правой. Особенности данной модели заключаются в том, что она описывает движение в центральном поле притяжения и учитывает воздействие атмосферы.



■ **Рис. 2.** Траектория НС относительно ОС в орбитальной системе координат

Для доказательства принципиальной возможности столкновения ОС и НС использовалась известная линеаризованная модель относительного движения для круговых орбит в орбитальной системе координат [5]:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\omega\dot{y} = P_x \\ \ddot{y} - 2\omega\dot{x} - 3\omega^2 y = 0, \\ \ddot{z} + \omega^2 z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{\mu}{R^3}}$ — средняя угловая скорость движения ОС по круговой орбите.

Погрешность модели (2) относительного движения для круговых орбит по сравнению с моделью (1) с учетом эллиптичности представлена на рис. 3. Из рисунка можно сделать вывод: для того чтобы погрешность модели (2) не превышала 5 % на интервале времени, равном двум виткам, эксцентриситет эллиптической орбиты должен быть меньше 0,0121. То есть модель (2) может применяться для предварительного исследования относительного движения для орбит ОС «Союз» и «Протон» и выяснения возможности соударения на орбите. Данный интервал времени был выбран в связи с тем, что при дальнейшем движении действие гравитационных сил и возмущение атмосферы разводят тела на большое расстояние, и они не сближаются.

Предварительный анализ возможности столкновения НС и ОС

Система уравнений (2) имеет аналитическое решение [5], которое удобно использовать для оценки возможности однократного столкновения.

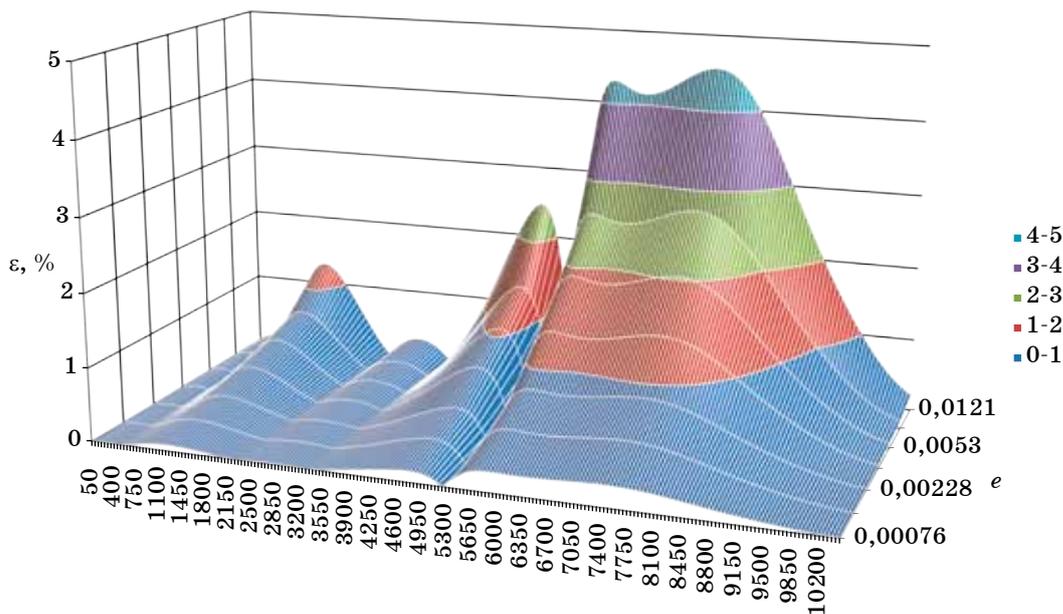
Для исследования было принято следующее условие столкновения двух тел (НС и ОС):

$$[(x(t^*)=0) \wedge (y(t^*)=0) \wedge (z(t^*)=0)],$$

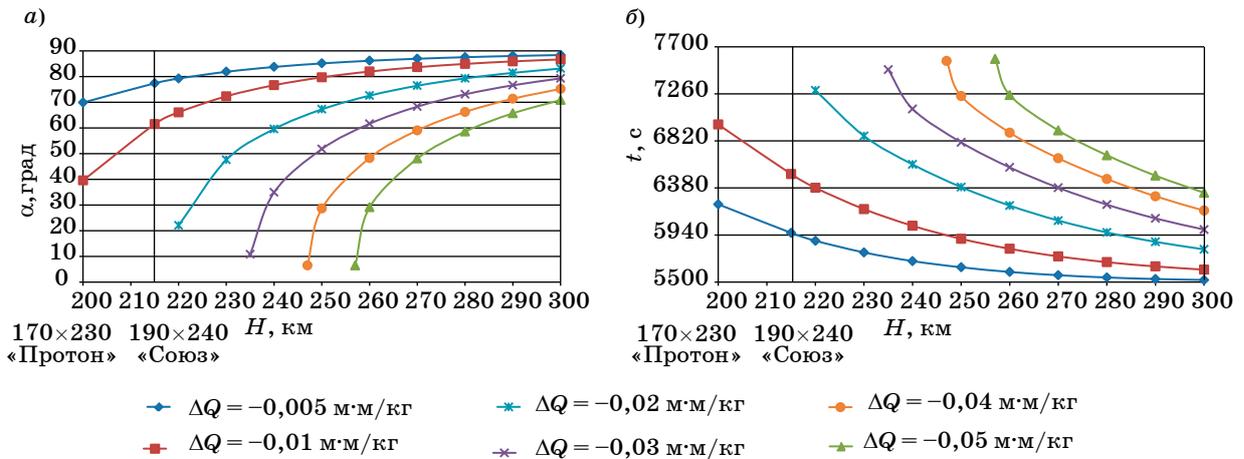
т. е. в определенный момент времени t^* при движении в орбитальной системе координат НС вернется в начало координат, которое находится в центре масс ОС, при этом разность баллистических коэффициентов между ОС и НС и высота орбиты фиксированы. Данное условие не учитывает размеры ОС, и его выполнение показывает принципиальную возможность столкновения ОС и НС.

Таким образом, при начальных условиях $x_0=y_0=z_0=0$ аналитическое решение приобретает вид

$$\begin{cases} -\frac{2V_{y_0}}{\omega} - 3V_{x_0}t + \left(\frac{2V_{y_0}}{\omega} - \frac{4P_x}{\omega^2}\right)\cos(\omega t) + \\ + \frac{4V_{x_0}}{\omega}\sin(\omega t) - \frac{3}{2}P_x t^2 + \frac{4P_x}{\omega^2} = 0 \\ \frac{2V_{x_0}}{\omega} - \frac{2V_{x_0}}{\omega}\cos(\omega t) + \left(\frac{V_{y_0}}{\omega} - \frac{2P_x}{\omega^2}\right)\sin(\omega t) + \frac{2P_x}{\omega}t = 0 \\ \frac{V_{z_0}}{\omega}\sin(\omega t) = 0 \end{cases}$$



■ Рис. 3. Погрешность модели относительного движения для околокруговых орбит ε в зависимости от эксцентриситета орбиты e и времени движения t



■ Рис. 4. Зависимость времени столкновения (а) и ориентации тела, от которого происходит отделение (б), от высоты орбиты при $\Delta V = 1 \text{ м/с}$

Рассматривается движение в плоскости орбиты, т. е. $V_{z_0} = 0$. Варьируя такими параметрами, как разность баллистических коэффициентов ΔQ , высота орбиты H , угол ориентации ОС (направление отделения НС) и скорость отделения НС ΔV , можно подобрать такие значения, которые удовлетворяют условию столкновения.

Исследовался диапазон высот от 200 до 300 км, так как на этих высотах влияние атмосферы существенно. Для каждой эллиптической орбиты можно подобрать эквивалентную по периоду круговую орбиту. Рассматривалось плоское движение на интервале времени двух витков полета. Результаты исследования представлены на рис. 4, а, б.

Эти графики можно применять для оценки возможности столкновения НС и ОС и определения момента времени, при котором оно возможно. Каждая точка на графиках соответствует набору параметров отделения, которые удовлетворяют условию столкновения НС и ОС в момент времени t^* . Таким образом, можно сделать вывод о том, что существует угроза столкновения НС и ОС на низких орбитах, и оно возможно на интервале времени, соответствующем от одного до полутора виткам.

Исследование вероятности попадания НС в окрестность ОС

Проведено исследование вероятности появления таких условий отделения НС, которые могут привести к вероятности его опасного сближения с ОС или основной ПН. Возникновение таких условий возможно в связи с тем, что после отделения основной ПН орбитальная ступень приобретает случайное значение угловой скорости, и в зависимости от интервала времени продольная ось

ОС займет заранее неизвестное положение в пространстве. Положение ОС определялось по модели регулярной прецессии (рис. 5).

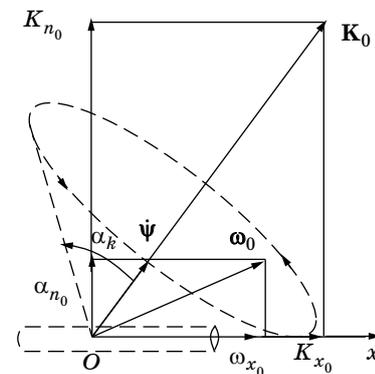
Из рисунка видно, что ОС будет поворачиваться вокруг вектора кинетического момента \mathbf{K}_0 по конусу с углом полураствора α_k . В зависимости от задержки отделения будет изменяться и угол ψ , на который повернется ОС относительно продольной оси. Для определения всех параметров поворота используются следующие формулы [6]:

$$\omega_{n_0} = \sqrt{\omega_{y_0}^2 + \omega_{z_0}^2}; K_{n_0} = I_n \omega_{n_0}; K_{x_0} = I_x \omega_{x_0};$$

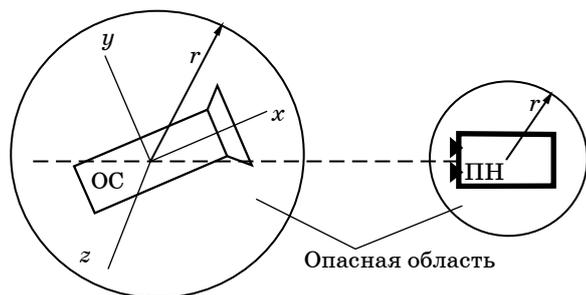
$$\mathbf{K}_0 = \sqrt{K_{x_0}^2 + K_{n_0}^2};$$

$$\alpha_k = \arcsin\left(\frac{K_{n_0}}{K_0}\right); \dot{\psi} = \frac{I_x \omega_{x_0}}{I_n \cos \alpha_k}; \psi = \dot{\psi} \cdot \Delta t,$$

где K_{n_0} и K_{x_0} — проекции вектора кинетического момента \mathbf{K}_0 ; I_n — поперечный момент инерции ОС; I_x — продольный момент инерции ОС; $\dot{\psi}$ —



■ Рис. 5. Прецессия ОС



■ Рис. 6. Опасная область

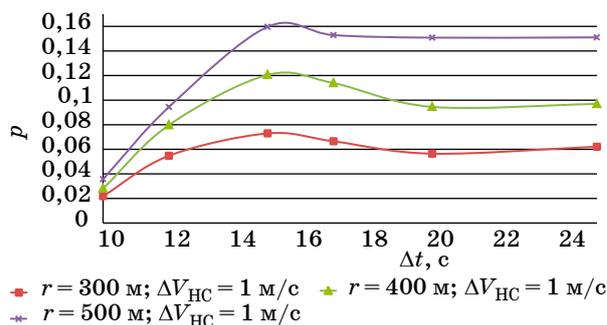
угловая скорость прецессии ОС; Δt — задержка отделения НС.

Выполнена оценка вероятности попадания НС в опасную область вокруг ОС и основной ПН. Под опасной областью (рис. 6) понимается сфера заданного радиуса с центром, совпадающим с центром масс ОС или центром масс ПН (попадание НС в эту область будет считаться опасным сближением).

Для стохастического исследования в качестве примера был выбран случай отделения НС от орбитальной ступени РН «Союз», так как для нее определены диапазоны проекций угловых скоростей, которые она приобретает после отделения основной ПН. Использовался метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Была сформирована выборка из 10 000 случайных значений проекций угловой скорости ОС в предположении нормального и равномерного закона распределения, что соответствует погрешностям в вычислении оценок вероятностных характеристик, не превышающих 1 %. Равномерный закон распределения принимался для получения гарантированных оценок вероятностных характеристик.

Моделирование проводилось по математической модели относительного движения с учетом эллиптичности орбиты (1). Начальные условия принимались следующими: геометрия эллиптической орбиты 190×240 км, баллистический коэффициент ОС $S_b^{OC} = 0,002$ м²/кг, баллистический коэффициент НС $S_b^{HC} = 0,01$ м²/кг, баллистический коэффициент основной ПН $S_b^{ПН} = 1,255 \cdot 10^{-3}$ м²/кг. В результате статистического моделирования были получены вероятности попадания НС в опасную область вокруг ОС в зависимости от ее радиуса и различных параметров отделения (рис. 7).

Исследованы случаи попадания НС в опасную область вокруг основной ПН. Проведено совместное моделирование относительного движения для НС и ПН. Основной ПН обычно являются космические аппараты с разгонными блоками



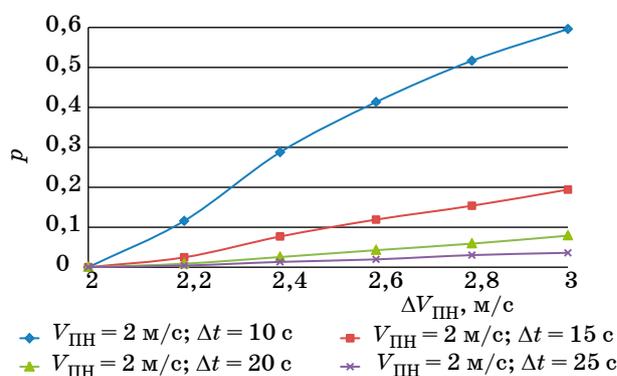
■ Рис. 7. Вероятность попадания НС в опасную область вокруг ОС

для перевода на целевые орбиты. Разгонный блок, как правило, включается через один виток после отделения от ОС, что исключает возможность столкновения на последующем интервале полета. Результаты исследования возможности столкновения НС и ПН на первом витке полета для равномерного закона распределения проекций угловой скорости ОС представлены на рис. 8.

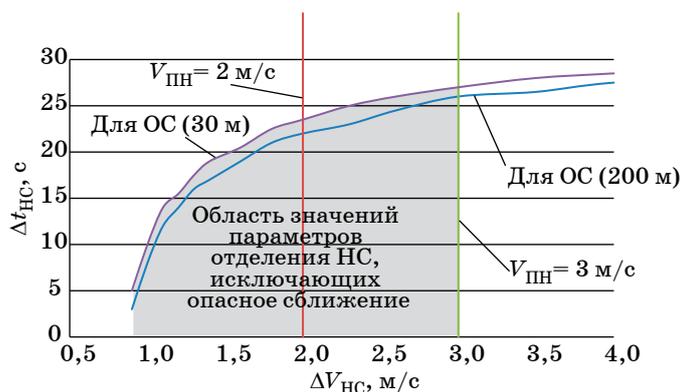
Таким образом, по графикам (см. рис. 7 и 8) можно оценить, с какой вероятностью НС может опасно сблизиться с ОС или с основной ПН. Также из рис. 7 можно сделать вывод, что столкновение НС с основной ПН возможно, если скорость отделения НС будет больше скорости отделения ПН.

Определение допустимой области параметров отделения НС

Результаты статистического моделирования позволили сформулировать рекомендации к выбору начальных условий отделения НС. При этом принимался равномерный закон распределения проекций угловой скорости, которую приобретает ОС после отделения основной ПН; ОС РН



■ Рис. 8. Зависимость вероятности попадания НС в опасную область вокруг ПН от задержки отделения НС для равномерного закона



■ Рис. 9. Область безопасных параметров отделения НС

«Союз» совершает движение по орбите с параметрами 190×240 км.

Область безопасных условий отделения НС как для ОС РН «Союз», так и для ПН показана на рис. 9.

Заключение

В результате выполненной работы выделена область допустимых параметров отделения НС

с учетом случайного характера ориентации ОС. При этом скорости отделения должны быть не меньше 1 м/с, а задержка во времени отделения НС после отделения ПН не должна превышать 5 с (при скорости отделения 1 м/с) и 20 с (при предельной скорости отделения НС 2 м/с).

Развитая методика определения допустимой области параметров отделения НС может быть использована и для исследования условий безопасного отделения НС от верхней ступени РН «Протон».

Литература

1. Belokonov I. V., Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Novikov V. N. Workability of “Soyuz” carrier rocket third stage for carrying out of research experiments and microsattellites launching // Shared Exploitation of Space Applications: Abstracts of the 1-st IAA Mediterranean Astronautical Conf., Tunis, 17–19 Nov., 2008. P. 14.
2. Proton Launch System Mission Planner’s Guide. Section 2. LKEB-9812-1990. Revision 7, July 2009. <http://www.ilslaunch.com/> (дата обращения: 20.01.2013).
3. Белоконов И. В., Круглов Г. Е., Трушляков В. И., Юдинцев В. В. Оценка возможности управляемого схода с орбиты верхней ступени РН «Союз» за счет использования остатков топлива в баках // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2(22). С. 105–111.
4. Bando M., Ichikawa A. Satellite formation and reconfiguration with restricted control interval // AIAA J. of Guidance, Control, and Dynamics. 2010. Vol. 33. N 2. P. 607–615.
5. Аппазов Р. Ф., Сытин О. Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников. – М.: Наука, 1987. – 440 с.
6. Belokonov I., Storozh A., Timbay I. Modes of motion of Soyuz orbital stage after payload separation at carrying out of the short-term research experiments // Advances in the Astronautical Sciences. 2012. Vol. 145. P. 99–107.

УДК 62-506.1 (047)

АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ НЕИЗВЕСТНЫХ МУЛЬТИГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПО УПРАВЛЕНИЮ

И. Б. Фуртат,

доктор техн. наук, профессор

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Рассмотрено решение задачи компенсации неизвестных периодических возмущений для линейных объектов с запаздыванием в управлении. Предполагалось, что возмущение представляет собой конечную сумму синусоидальных сигналов с неизвестными амплитудами, кратными частотами и фазами. Для построения компенсатора использовался адаптивный идентификатор частот синусоидальных сигналов, основанный на методе скоростного градиента. Для компенсации возмущений применялся метод вспомогательного контура. Полученный алгоритм обобщен для управления динамической сетью с коммуникационным запаздыванием. В результате синтезированная система управления обеспечивает точную компенсацию возмущений. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие эффективность предложенной схемы.

Ключевые слова — объект с запаздыванием по управлению, компенсация возмущений, идентификация.

Введение

Задача построения простых и эффективных алгоритмов в условиях неопределенности была и остается актуальной в теории и практике автоматического регулирования. Она значительно усложняется, если в объекте присутствует запаздывание в канале управления. Неучет данного запаздывания может привести к потере качества регулирования, а иногда и к потере устойчивости замкнутой системы.

Впервые для управления объектами с запаздыванием с известными параметрами был предложен предиктор Смита [1]. Затем был разработан последовательный компенсатор запаздывания на базе регулятора Ресвика [2, 3]. Для дискретных систем в работе [4] предложен предиктор Цыпкина. В условиях параметрической неопределенности в настоящее время существует два принципа управления: с использованием предикторов [5] и без них [6, 7]. Более подробный обзор по данным методам сделан в статье [8].

Однако перечисленные методы [1–8] оказываются малоэффективными, когда объект управления подвержен действию внешних неконтролируемых возмущений. Так, было установлено [9], что для компенсации внешних возмущений с требуемой точностью необходимо, чтобы $h \leq \omega^{-1}$,

где h — время запаздывания в канале управления; ω — максимальный спектр внешнего возмущения. Проблема компенсации возмущений существенно усложняется, если необходимо управлять сетью динамических объектов в условиях коммуникационного запаздывания, возникающего при обмене информацией между подсистемами сети и регулятором. И, насколько известно автору статьи, по данной проблеме до сих пор нет решений. Поэтому настоящая статья посвящена решению задачи компенсации возмущений для объектов с запаздыванием по управлению, где не предъявляются требования к зависимости параметров возмущения от параметров объекта.

В работе рассматривается простой алгоритм компенсации периодических неизвестных возмущений. Предполагается, что возмущения представляют собой сумму синусоид с неизвестными амплитудами, неизвестными кратными частотами и неизвестными фазами. Для выделения и компенсации возмущений используется метод вспомогательного контура [10]. Для прогноза регулируемой величины на время запаздывания используется метод адаптивной идентификации частоты синусоидального сигнала [11], позволяющий определить период неизвестного возмущения. Полученные результа-

ты распространяются на управление динамическими сетями с коммуникационным запаздыванием. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие работоспособность алгоритма.

Постановка задачи

Рассмотрим объект управления, динамические процессы в котором описываются следующим уравнением:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t-h) + \mathbf{B}f(t-h), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t) \in R^n$ — вектор состояния; $u(t) \in R$ — управляющее воздействие; $f(t) \in R$ — внешнее возмущение;

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_{n-1} \\ -a_0 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \in R^{n \times n}$ и $\mathbf{B} = [0, \dots, 0, b]^T \in R^n$ — известные гурвицева матрица и вектор, $b > 0$, пара (\mathbf{A}, \mathbf{B}) — управляема; $h > 0$ — известное время запаздывания.

Предположения А.

1. Внешнее возмущение $f(t)$ — периодическая функция с неизвестным периодом $T > 0$, которая определена выражением $f(t) = \sum_{i=1}^k A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$,

где A_i , ω_i и φ_i — неизвестные амплитуда, частота и фаза, причем периоды $T_i = 2\pi/\omega_i$ — кратные; k — известное число. Ради простоты положим, что $T > h$.

2. Измерению доступны сигналы $\mathbf{x}(t)$, $\dot{\mathbf{x}}(t)$ и $u(t)$.

Целью управления является синтез алгоритмической структуры управляющего устройства, обеспечивающей стабилизацию объекта, т. е.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t) = 0. \quad (2)$$

Метод решения. Согласно работе [10], для выделения возмущения $f(t-h)$ введем вспомогательный контур

$$\dot{\mathbf{x}}_v(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_v(t) + \mathbf{B}u(t-h), \quad (3)$$

где $\mathbf{x}_v(t) \in R^n$ — вектор состояния. Принимая во внимание (1) и (3), рассмотрим уравнение для рассогласования $\xi(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_v(t)$ в виде

$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{A}\xi(t) + \mathbf{B}f(t-h). \quad (4)$$

Перепишем уравнение (4) в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1(t) &= \xi_2(t); \\ &\vdots \\ \dot{\xi}_{n-1}(t) &= \xi_n(t); \\ \dot{\xi}_n(t) &= \mathbf{a}\xi(t) + bf(t-h). \end{aligned}$$

Здесь $\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_n(t)]^T$; $\mathbf{a} = [-a_0, \dots, -a_n]$. Из данной системы уравнений очевидно, что в явном виде функция $f(t-h)$ присутствует только в последнем уравнении. Поэтому сигнал $f(t-h)$ можно определить как

$$f(t-h) = b^{-1}(\dot{\xi}_n(t) - \mathbf{a}\xi(t)).$$

Обозначим $\varphi(t) = b^{-1}(\dot{\xi}_n(t) - \mathbf{a}\xi(t))$. Тогда для компенсации функции $f(t-h)$ закон управления $u(t)$ можно сформировать в виде

$$u(t) = -\varphi(t+h). \quad (5)$$

Однако для реализации сигнала управления (5) необходимо знание функции $\varphi(t+h)$. Согласно предположению А1, функция $f(t)$ — периодическая, значит, закон управления (5) можно переписать в виде

$$u(t) = -\varphi(t+h-T). \quad (6)$$

Подставив (6) в (1), получим уравнение замкнутой системы в виде

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t). \quad (7)$$

Таким образом, закон управления (6) обеспечивает компенсацию неизвестного возмущения $f(t-h)$. В силу гурвицевости матрицы \mathbf{A} система (7) будет асимптотически устойчивой.

Теперь необходимо определить период T функции $f(t)$. Идентификацию периода T будем определять по идентифицированным частотам синусоид функции $f(t)$, алгоритм поиска которых рассмотрен в работе [11].

Продифференцируем функцию $\varphi(t)$ $2k$ раз и результат запишем в виде

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) \\ \vdots \\ \varphi^{(2k-2)}(t) \end{bmatrix} &= V \begin{bmatrix} A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1 - \omega_1 h) \\ A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2 - \omega_2 h) \\ \vdots \\ A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k - \omega_k h) \end{bmatrix}, \\ V &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{k-1} & z_2^{k-1} & \dots & z_k^{k-1} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\omega_i \neq \omega_j$ и $z_i \neq z_j$ для $i \neq j$, $z_i = -\omega_i^2$.

С учетом (8) запишем выражение для $\varphi^{(2k)}(t)$ в виде

$$\begin{aligned} \varphi^{(2k)}(t) &= [z_1^k, z_2^k, \dots, z_k^k] \times \\ &\times V^{-1} [\varphi(t), \dot{\varphi}(t), \dots, \varphi^{(2k-2)}(t)]^T = \\ &= -\theta_1 \varphi^{(2k-2)}(t) - \dots - \theta_{k-1} \dot{\varphi}(t) - \theta_k \varphi(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь θ_i — параметры, зависящие от частот ω_i . Найдем от (9) преобразование Лапласа

$$s^{2k} \varphi(s) = -\theta_1 s^{(2k-2)} \varphi(s) - \dots - \theta_{k-1} s^2 \varphi(s) - \theta_k \varphi(s), \quad (10)$$

где s — комплексная переменная. Рассмотрим гурвицевый полином $\delta(s) = s^{2k} + \lambda_{2k} s^{2k-1} + \dots + \lambda_{2s} + \lambda_1$ и введем обозначение

$$\mu_i = \lambda_{2i+1} - \theta_{k-i}, \quad i=0, \dots, k-1.$$

Тогда (10) можно переписать в виде

$$\varphi(s) = \sum_{i=1}^k \left(\lambda_{2i} \frac{s^{2i-1}}{\delta(s)} + \mu_{i-1} \frac{s^{2i-2}}{\delta(s)} \right) \varphi(s). \quad (11)$$

Для уравнения (11) введем фильтр

$$\dot{\mathfrak{Q}}(t) = \mathbf{F}\mathfrak{Q}(t) + \mathbf{b}_0 \varphi(t), \quad (12)$$

где \mathbf{F} — матрица в форме Фробениуса с характеристическим многочленом $\delta(s)$; $\mathbf{b}_0 = [0, \dots, 0, 1]^T$. С учетом (12) перепишем (11) в виде

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^k \lambda_{2i} \mathfrak{Q}_{2i}(t) + \sum_{i=1}^k \mu_{i-1} \mathfrak{Q}_{2i-1}(t). \quad (13)$$

Введем в рассмотрение новую функцию

$$\bar{\varphi}(t) = \sum_{i=1}^k \lambda_{2i} \mathfrak{Q}_{2i}(t) + \sum_{i=1}^k \bar{\mu}_{i-1}(t) \mathfrak{Q}_{2i-1}(t), \quad (14)$$

где $\bar{\mu}_{i-1}(t)$ — оценка значения μ_{i-1} . Сформируем уравнение ошибки $e(t) = \bar{\varphi}(t) - \varphi(t)$. Принимая во внимание (13) и (14), запишем уравнение для $e(t)$ в виде

$$e(t) = \sum_{i=1}^k (\bar{\mu}_{i-1}(t) - \mu_{i-1}) \mathfrak{Q}_{2i-1}(t).$$

Согласно работе [11], для того чтобы $e(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, а соответственно, и $\bar{\mu}_{i-1}(t) \rightarrow \mu_{i-1}$, $i=0, \dots, k-1$ при $t \rightarrow \infty$, достаточно алгоритм адаптации выбрать в виде

$$\dot{\Phi}(t) = -\alpha e(t) \Theta(t), \quad \alpha > 0, \quad (15)$$

где $\Phi(t) = [\bar{\mu}_0(t), \bar{\mu}_1(t), \dots, \bar{\mu}_{k-1}(t)]^T$; $\Theta(t) = [\mathfrak{Q}_1(t), \mathfrak{Q}_3(t), \dots, \mathfrak{Q}_{2k-1}(t)]^T$.

Сформулируем утверждение, при выполнении условий которого система управления (3), (6), (12), (15) обеспечивает выполнение цели (2).

Утверждение 1. Пусть выполнены условия предположений A1, A2. Тогда система управления (3), (6), (12), (15) обеспечивает выполнение целевого условия (2).

Замечание 1. Часто в режиме on-line сложно оценить период T функции $f(t)$, так как T является наименьшим общим кратным частот ω_i . Тогда закон управления (6) можно сформировать в виде

$$u(t) = -\varphi(t + h - \bar{T}). \quad (16)$$

Здесь \bar{T} можно находить по формуле

$$\bar{T} = \prod_{i=1}^k \frac{2\pi}{\bar{\omega}_i(t)}, \quad (17)$$

где $\bar{\omega}_i(t)$ — оценки частот ω_i , полученные с помощью алгоритма (12), (15).

Обобщение алгоритма для управления динамическими сетями с коммуникационным запаздыванием

Рассмотрим динамическую сеть, в которой каждая локальная подсистема описывается уравнением

$$\dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}u_i(t) + \mathbf{V}f_i(t), \quad i=1, \dots, N, \quad (18)$$

где $\mathbf{x}_i(t) \in R^n$ — вектор состояния; $u_i(t) \in R$ — управляющее воздействие; $f_i(t) \in R$ — внешнее возмущение; матрица \mathbf{A} и вектор \mathbf{B} те же, что и в пункте А.

Целью управления является синтез алгоритмической структуры управляющего устройства, обеспечивающей выполнение условия консенсуса

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{x}_i(t-h) - \mathbf{x}_j(t-h)) = 0, \quad (19)$$

где $h > 0$ — коммуникационное запаздывание.

Предположения В.

1. Внешнее возмущение $f_i(t)$ — периодическая функция с неизвестным периодом $T > 0$, которая определена выражением

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^k A_{i,j} \sin(\omega_{i,j} t + \varphi_{i,j}),$$

где $A_{i,j}$, $\omega_{i,j}$ и $\varphi_{i,j}$ — неизвестные амплитуды, неизвестные кратные частоты и неизвестные фазы; k — известное число. Ради простоты положим, что $T_i > h$.

2. Измерению доступны сигналы $\mathbf{x}_i(t)$, $\dot{\mathbf{x}}_i(t)$ и $u_i(t)$.

3. Орграф, ассоциированный с динамической сетью, содержит ориентированное остовное дерево. Под ориентированным остовным деревом понимается ориентированное дерево, составленное из ребер орграфа и такое, что в нем существует путь из корня в любую другую вершину [12, 13].

Введем уравнение ошибки

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) = \sum_{j \in N_i} \mathbf{x}_i(t-h) - \mathbf{x}_j(t-h),$$

где N_i — множество смежных подсистем для i -й подсистемы. Продифференцировав $\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)$ по времени вдоль траекторий уравнений (18), получим

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(t) = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) + \mathbf{B}u_i(t-h) - \mathbf{B}u_j(t-h) + \mathbf{B}\psi_i(t-h), \quad (20)$$

где $\psi_i(t) = f_i(t) - f_j(t)$. Зададим закон управления $u_i(t)$ в виде

$$u_i(t) = v_i(t) + u_j(t), \quad (21)$$

где $v_j(t)$ — вспомогательное управляющее воздействие. Согласно работам [10, 14], введем вспомогательный контур

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{vi}(t) = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}_{vi}(t) + \mathbf{B}v_i(t-h), \quad (22)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_{vi}(t) \in R^n$. Принимая во внимание (20)–(22), составим уравнение $\dot{\boldsymbol{\xi}}_i(t) = \boldsymbol{\varepsilon}_i(t) - \boldsymbol{\varepsilon}_{vi}(t)$ в виде

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_i(t) = \mathbf{A}\boldsymbol{\xi}_i(t) + \mathbf{B}\psi_i(t-h). \quad (23)$$

Перепишем (23) в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{1,i}(t) &= \xi_{2,i}(t); \\ &\vdots \\ \dot{\xi}_{n-1,i}(t) &= \xi_{n,i}(t); \\ \dot{\xi}_{n,i}(t) &= \mathbf{a}\boldsymbol{\xi}_i(t) + b\psi_i(t-h). \end{aligned}$$

Здесь $\boldsymbol{\xi}_i(t) = [\xi_{1,i}(t), \xi_{2,i}(t), \dots, \xi_{n,i}(t)]^T$. Тогда сигнал $\psi_i(t-h)$ можно определить как

$$\psi_i(t-h) = b^{-1}(\dot{\xi}_{n,i}(t) - \mathbf{a}\boldsymbol{\xi}_i(t)).$$

Обозначим $\varphi_i(t) = b^{-1}(\dot{\xi}_{n,i}(t) - \mathbf{a}\boldsymbol{\xi}_i(t))$. Тогда вспомогательное управляющее воздействие $v_i(t)$ можно сформировать в виде

$$v_i(t) = -\varphi_i(t+h-T). \quad (24)$$

Подставив (21) и (24) в (20), получим уравнение замкнутой системы

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i(t) = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}_i(t). \quad (25)$$

Таким образом, закон управления (21), (24) обеспечивает компенсацию неизвестного возмущения $\psi_i(t-h)$. В силу гурвицевости матрицы \mathbf{A} система (25) будет асимптотически устойчивой.

Для идентификации периода T воспользуемся результатом [11], который описан в пункте «Метод решения». Система идентификации будет представлена следующими уравнениями:

— фильтры состояния

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}_i(t) = \mathbf{F}\boldsymbol{\Phi}_i(t) + \mathbf{b}_0\varphi_i(t), \quad (26)$$

где \mathbf{F} и \mathbf{b}_0 аналогичны введенным в (12);

— алгоритмы идентификации

$$\dot{\boldsymbol{\Theta}}_i(t) = -\alpha e_i(t)\boldsymbol{\Theta}_i(t), \quad \alpha > 0, \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Phi}_i(t) &= [\bar{\mu}_{0,i}(t), \bar{\mu}_{1,i}(t), \dots, \bar{\mu}_{k-1,i}(t)]^T; \\ \boldsymbol{\Theta}(t) &= [\vartheta_{1,i}(t), \vartheta_{3,i}(t), \dots, \vartheta_{2k-1,i}(t)]^T; \end{aligned}$$

$$e_i(t) = \bar{\varphi}_i(t) - \varphi_i(t),$$

$$\bar{\varphi}_i(t) = \sum_{l=1}^k \lambda_{2l} \vartheta_{2l,i}(t) + \sum_{l=1}^k \bar{\mu}_{l-1,i}(t) \vartheta_{2l-1,i}(t),$$

$$\varphi_i(s) = \sum_{l=1}^k \left(\lambda_{2l} \frac{s^{2l-1}}{\delta(s)} + \bar{\mu}_{l-1,i} \frac{s^{2l-2}}{\delta(s)} \right) \varphi_i(s),$$

$$\mu_{l,i} = \lambda_{2l+1} - \theta_{k-l,i}, \quad l=0, \dots, k-1.$$

Утверждение 2. Пусть выполнены условия предположений В1–В3. Тогда система управления (21), (22), (24), (26), (27) обеспечивает выполнение целевого условия (2).

Замечание 2. Закон управления (24) можно сформировать в виде

$$v_i(t) = -\varphi_i(t+h-\bar{T}_i), \quad (28)$$

где \bar{T} можно находить по формуле

$$\bar{T}_i = \prod_{j=1}^k \frac{2\pi}{\bar{\omega}_{j,i}}. \quad (29)$$

Здесь $\bar{\omega}_{j,i}(t)$ — оценки частот $\omega_{j,i}$, полученные с помощью алгоритма (26), (27).

Проиллюстрируем полученные результаты на следующих примерах.

Примеры

1. Рассмотрим объект управления вида (1)

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t-1) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t-1); \\ \mathbf{x}(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}^T, \end{aligned} \quad (30)$$

где $f(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$.

Цель управления — компенсация неизвестного возмущения $f(t)$ так, чтобы было выполнено условие (2).

Зададим вспомогательный контур (3) в виде

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_v(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \mathbf{x}_v(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t-1); \\ \mathbf{x}_v(0) &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (31)$$

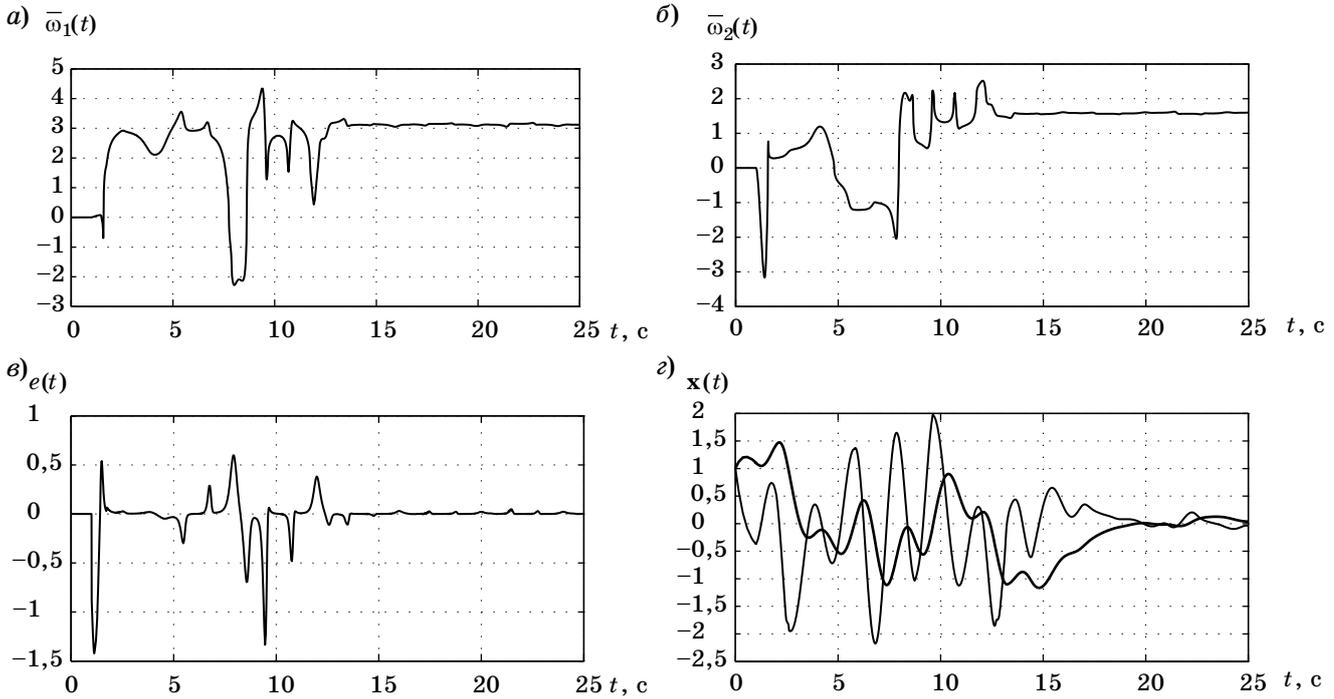
и составим уравнение для рассогласования $\boldsymbol{\xi}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_v(t)$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \boldsymbol{\xi}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t-1).$$

Выделим в последнем уравнении вторую строку

$$\dot{\xi}_2(t) = [-1 \quad -2] \boldsymbol{\xi}(t) + f(t-1).$$

Тогда $f(t-1) = \dot{\xi}_2(t) - [-1 \quad -2] \boldsymbol{\xi}(t) = \varphi(t)$.



■ Рис. 1. Переходные процессы по $\bar{\omega}_1(t)$ (а), $\bar{\omega}_2(t)$ (б), $e(t)$ (в) и $x(t)$ в замкнутой системе (г)

Определим теперь частоты ω_1 и ω_2 . Выберем $\delta(s) = s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1$. Сформируем фильтр (12) в виде

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta}_1(t) &= \vartheta_2(t), \\ \dot{\vartheta}_2(t) &= \vartheta_3(t), \\ \dot{\vartheta}_3(t) &= \vartheta_4(t), \\ \dot{\vartheta}_4(t) &= -\vartheta_1(t) - 4\vartheta_2(t) - 6\vartheta_3(t) - 4\vartheta_4(t) + \varphi(t), \\ \vartheta_1(0) &= \vartheta_2(0) = \vartheta_3(0) = \vartheta_4(0) = 0. \end{aligned}$$

Пусть $\alpha = 1000$. Тогда алгоритм (15) определится в виде

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\varphi}}_0(t) &= -1000e(t)\vartheta_3(t), \quad \bar{\varphi}_0(0) = 0; \\ \dot{\bar{\varphi}}_1(t) &= -1000e(t)\vartheta_1(t), \quad \bar{\varphi}_1(0) = 0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} e(t) &= \bar{\varphi}(t) - \varphi(t), \\ \bar{\varphi}(t) &= 4\vartheta_4(t) + 4\vartheta_2(t) + \\ &+ (6 - \bar{\varphi}_0(t))\vartheta_3(t) + (1 - \bar{\varphi}_1(t))\vartheta_1(t). \end{aligned}$$

Оценки частот ω_1 и ω_2 можно найти по следующим формулам:

$$\bar{\omega}_{1,2}(t) = \sqrt{\frac{-\bar{\varphi}_1(t) \pm \sqrt{\bar{\varphi}_1^2(t) - 4\bar{\varphi}_2(t)}}{2}}.$$

Зададим закон управления (16), где

$$\bar{T}(t) = \frac{4\pi^2}{\bar{\omega}_1(t)\bar{\omega}_2(t)}.$$

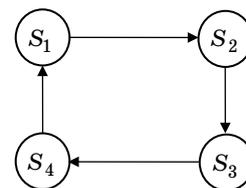
Пусть в функции $f(t)$ $A_1 = 1$, $A_2 = 3$, $\omega_1 = \pi/2$, $\omega_2 = \pi$, $\varphi_1 = \pi/3$, $\varphi_2 = \pi/4$. На рис. 1, а-г представлены результаты моделирования в замкнутой системе.

Результаты моделирования показали, что поставленная цель (2) выполняется.

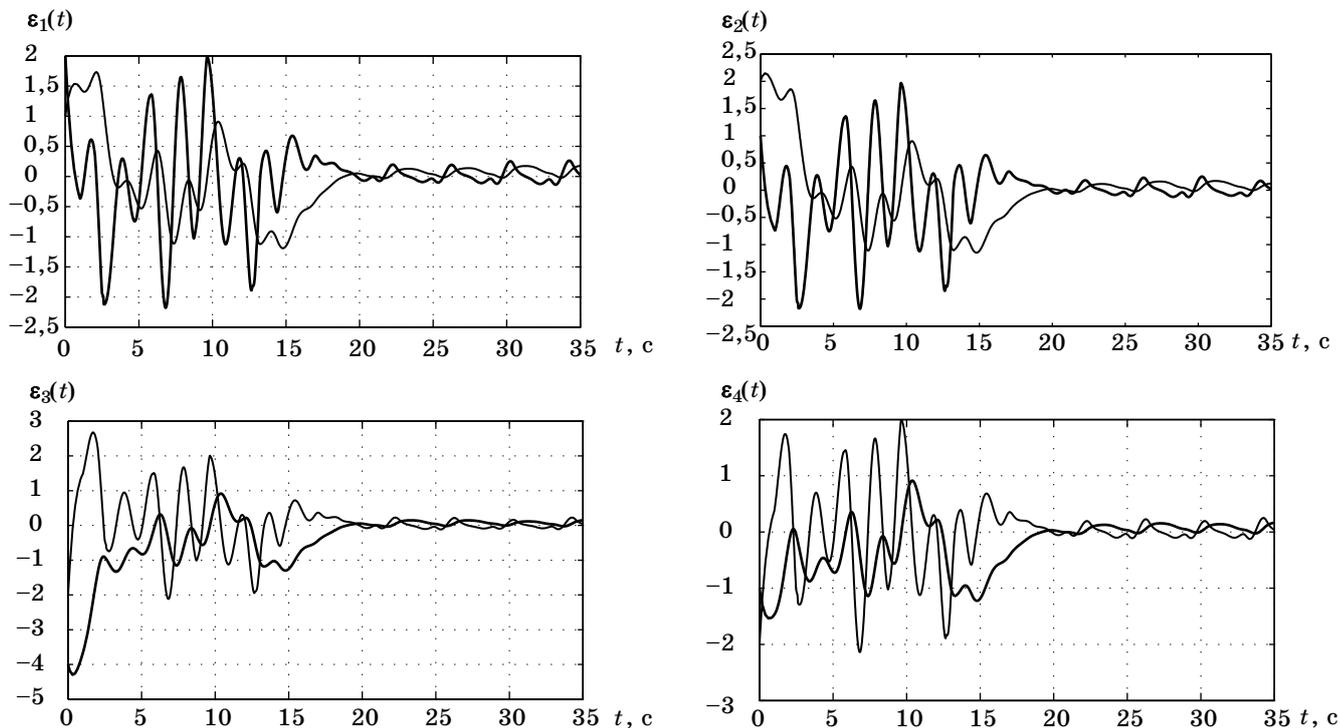
2. Рассмотрим динамическую сеть, состоящую из четырех подсистем S_i , $i = 1, \dots, 4$ (рис. 2).

Пусть каждая подсистема сети описывается уравнением

$$\dot{x}_i(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} x_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f_i(t), \quad i = 1, \dots, 4,$$



■ Рис. 2. Схема сети



■ Рис. 3. Переходные процессы по $\varepsilon_i(t)$

где $f_i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$, $\mathbf{x}_1(0) = [1 \ 1]^T$, $\mathbf{x}_2(0) = [3 \ 2]^T$, $\mathbf{x}_3(0) = [-1 \ 0]^T$ и $\mathbf{x}_4(0) = [0 \ -1]^T$.

Цель управления — компенсация неизвестного возмущения $f(t)$ так, чтобы было выполнено условие (19), где коммуникационное запаздывание $h = 1$ с.

Сформируем систему управления, состоящую:
 — из закона управления (21) и вспомогательного управляющего воздействия (28);
 — вспомогательного контура (23)

$$\dot{\varepsilon}_{vi}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \varepsilon_{vi}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_i(t-1), \quad \varepsilon_{vi}(0) = 0;$$

— фильтра (26)

$$\dot{\vartheta}_{1,i}(t) = \vartheta_{2,i}(t),$$

$$\dot{\vartheta}_{2,i}(t) = \vartheta_{3,i}(t),$$

$$\dot{\vartheta}_{3,i}(t) = \vartheta_{4,i}(t),$$

$$\dot{\vartheta}_{4,i}(t) = -\vartheta_{1,i}(t) - 4\vartheta_{2,i}(t) - 6\vartheta_{3,i}(t) - 4\vartheta_{4,i}(t) + \varphi_i(t),$$

$$\vartheta_{1,i}(0) = \vartheta_{2,i}(0) = \vartheta_{3,i}(0) = \vartheta_{4,i}(0) = 0;$$

— алгоритмов идентификации (27)

$$\dot{\bar{\varphi}}_{0,i}(t) = -1000e_i(t)\vartheta_{3,i}(t), \quad \bar{\varphi}_{0,i}(t) = 0;$$

$$\dot{\bar{\varphi}}_{1,i}(t) = -1000e_i(t)\vartheta_{1,i}(t), \quad \bar{\varphi}_{1,i}(t) = 0.$$

Оценки частот $\omega_{1,i}$ и $\omega_{2,i}$ можно найти по следующим формулам:

$$\dot{\bar{\omega}}_{(1,2),i}(t) = \sqrt{\frac{-\bar{\varphi}_{1,i}(t) \pm \sqrt{\bar{\varphi}_{1,i}^2(t) - 4\bar{\varphi}_{2,i}(t)}}{2}}.$$

Зададим вспомогательное управляющее воздействие в виде (28), где $\bar{T}_i(t) = \frac{4\pi^2}{\bar{\omega}_{1,i}(t)\bar{\omega}_{2,i}(t)}$.

Пусть в функциях $f_i(t)$ $A_1 = 1$, $A_2 = 3$, $A_3 = 2$, $A_4 = 4$, $\omega_1 = \pi/2$, $\omega_2 = \pi$, $\omega_3 = \pi/2$, $\omega_4 = \pi/4$, $\varphi_1 = \pi/3$, $\varphi_2 = \pi/4$, $\varphi_3 = \pi/6$, $\varphi_4 = \pi/2$. На рис. 3 представлены переходные процессы по $\varepsilon_i(t)$, $i = 1, \dots, 4$.

Результаты моделирования показали, что поставленная цель (19) выполняется.

Заключение

В статье предложен синтез простой системы компенсации внешнего неизвестного ограниченного периодического возмущения, основанной на адаптивной идентификации частот синусоидальных сигналов с кратными периодами. Следует отметить, что применение данного способа компенсации требует точных оценок (без смещений) частот синусоидальных сигналов. В противном случае смещение идентифицируемых частот от истинных может привести к невыполнению постав-

ленной цели (2) или (19). Допускается оценка частот в некотором множестве, однако среднее значение оценки должно быть истинным. Время переходных процессов в системе управления напрямую зависит от времени идентификации частот синусоидальных сигналов.

Используемый в статье алгоритм идентификации частот синусоидальных сигналов достаточно чувствителен к помехам измерения или к ситуации, когда на возмущение наложена нерегуляр-

ная составляющая. В таких случаях необходимо применять различные фильтры для уменьшения влияния помехи или нерегулярных составляющих.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-08-01014, 12-08-01183), а также программы ОЭММПУ РАН «Анализ и оптимизация функционирования систем многоуровневого, интеллектуального и сетевого управления в условиях неопределенности» № 14.

Литература

1. **Smith J. M.** Closer control of loops with dead time // *Chem. Eng. Prog.* 1959. Vol. 53. P. 217–219.
2. **Гурецкий Х.** Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1973. – 328 с.
3. **Колмановский В. Б., Носов В. Р.** Устойчивость и периодические режимы регулируемых систем с последствием. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
4. **Цыпкин Я. З.** Оптимальные адаптивные системы управления объектами с запаздыванием // *Автоматика и телемеханика.* 1986. № 8. С. 5–24.
5. **Фуртат И. Б., Цыкунов А. М.** Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2005. № 7. С. 15–19.
6. **Furtat I. B., Thykunov A. M.** Output adaptive control for plants using time delay in output signal based on the modified algorithm of adaptation of the high order // *Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP '07): 9th IFAC Workshop/ IPACS Electronic Library.* 2007. <http://lib.physcon.ru/doc?id=9df9ebaa7845> (дата обращения: 11.09.2013).
7. **Niculescu S. I., Annaswamy A. M.** An adaptive Smith-controller for time-delay systems with relative degree $n \leq 2$ // *Systems and Control Letters.* 2003. Vol. 49. N 5. P. 347–358.
8. **Фуртат И. Б.** Адаптивное управление объектом с запаздыванием по управлению без использования прогнозирующих устройств // *Управление большими системами.* 2012. Вып. 40. С. 144–163.
9. **Цыкунов А. М.** Следящие системы для линейных объектов с запаздывающим управлением // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2008. № 8. С. 7–12.
10. **Цыкунов А. М.** Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // *Автоматика и телемеханика.* 2007. № 7. С. 103–115.
11. **Xia X.** Global Frequency Estimation Using Adaptive Identifiers // *IEEE Trans. on Automatic Control.* 2002. Vol. 47. N 7. P. 1188–1193.
12. **Ren W., Beard R. W.** Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies // *IEEE Trans. on Automatic Control.* 2005. Vol. 50. N 5. P. 655–661.
13. **Агаев Р. П., Чеботарев П. Ю.** Матрица максимальных исходящих лесов орграфа и ее применения // *Автоматика и телемеханика.* 2000. № 9. С. 15–43.
14. **Фуртат И. Б.** Робастная синхронизация динамической сети с переключающейся структурой // *Информационно-управляющие системы.* 2011. № 5. С. 23–30.

УДК 621.396

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНФЛИКТА СЛОЖНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Г. Н. Мальцев,

доктор техн. наук, профессор

В. В. Вознюк,

канд. техн. наук, доцент

М. Р. Туктамышев,

канд. техн. наук, доцент

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Предложен методический аппарат построения моделей функционирования конфликтующих сложных радиотехнических систем на основе метода описания параллельных развивающихся стохастических процессов. Моделируемый конфликт представляется совокупностью взаимодействующих случайных дискретно-событийных процессов, заданных сетевой структурой типа сети Петри. Представлен набор подсетей и функций переходов, позволяющий описать радиоэлектронный конфликт системы радиосвязи с комплексом радиопротиводействия. Приведены результаты исследования временных характеристик задержки передачи сообщений в условиях преднамеренных помех с использованием программной модели конфликта, построенной в соответствии с рассмотренной методикой.

Ключевые слова — конфликт сложных радиотехнических систем, методы моделирования, радиоэлектронный конфликт, моделирование конфликта.

Введение

Центральной задачей при разработке методического аппарата обоснования требований к системам различного назначения является построение адекватной и достоверной математической модели объекта исследования. Особое значение такие модели приобретают при разработке сложных конфликтно-устойчивых систем, предназначенных для функционирования в условиях динамического взаимодействия (конфликта) при слабо предсказуемом поведении противоположной (конфликтующей) стороны. К числу таких систем относятся сложные радиотехнические системы, функционирующие в условиях радиоэлектронного конфликта, обусловленного ведением одной из конфликтующих сторон радиоэлектронного противодействия [1, 2].

Наиболее распространенные методы моделирования конфликтного взаимодействия [3–5] могут быть объединены в три группы. Первая группа —

аналитические методы, использующие модели дискретных и дискретно-непрерывных марковских (полумарковских) процессов, и связанные с ними методы теории систем массового обслуживания. Вторая группа — методы прямого имитационного моделирования, использующие как простейшие приемы теории статистических испытаний, так и функционально ориентированные программные комплексы. Третья группа — комбинированные методы моделирования, а также специально разработанные методы, не относящиеся в полной мере ни к аналитическим, ни к имитационным. Типичным представителем таких методов является математический аппарат теории сетей Петри и его многочисленные разновидности [6, 7].

В то же время к настоящему времени не выработано единых научно обоснованных рекомендаций по способам формализации логико-событийных моделей функционирования сложных систем в условиях конфликтного взаимодействия. Поэтому была предпринята попытка разработать

математический аппарат построения исследовательских моделей функционирования конфликтующих систем, основанный на использовании базовых понятий сетей Петри [7] и метода описания параллельных развивающихся стохастических процессов [4], ориентированный на описание радиоэлектронного конфликта.

Методический аппарат построения моделей функционирования конфликтующих радиотехнических систем методом параллельных развивающихся стохастических процессов

Рассмотрим основные положения предлагаемого методического аппарата на примере разработки модели конфликта некоторой системы радиосвязи (СРС, сторона А) и противодействующего ей комплекса радиопротиводействия (КРП, сторона Б). Несмотря на возможные отличия объектов моделирования, а также целей проводимых исследований, построение искомого формализованного описания разрабатываемой модели в общем случае предполагает проведение следующих трех этапов разработки.

Первый этап — анализ состава, структуры конфликтующих систем и механизма их взаимного влияния в динамике функционирования с целью сформировать обобщенную схему исследуемого конфликта. Эта схема должна содержать полный перечень подсистем исследуемых систем и все основные их внутренние и внешние взаимосвязи. Вариант такой схемы радиоэлектронного конфликта подавляемой СРС, осуществляющего постановку ей преднамеренных помех КРП с обозначением основных функциональных подсистем конфликтующих сторон и направлений передачи информации, существенной для их поведения, представлен на рис. 1.

Сущность исследуемого конфликта состоит в стремлении КРП сорвать или, по крайней мере, задержать передачу информации в СРС, создавая преднамеренные помехи ее средствам при стремлении СРС максимально снизить эффективность этих помех. Осуществляется это в СРС путем принятия адекватных мер помехозащиты с целью обеспечить передачу информации в условиях действия помех, создаваемых КРП, с минимальной задержкой. Выбранная степень детализации конфликта обусловлена наличием у конфликтующих сторон соответствующих функционально законченных и относительно обособленных подсистем, каждая из которых образована соответствующими средствами и играет свою определенную роль в конфликте.

Известно, что для выбора и постановки эффективных помех в состав типового КРП кроме соб-

ственно средств постановки помех входят средства контроля и анализа радиосигналов подавляемой СРС и средства управления постановкой помех [8]. При этом СРС для принятия адекватных мер помехозащиты может располагать средствами контроля качества связи и оценки помеховой обстановки и иметь возможность управлять своими средствами связи в ходе их использования [9].

Второй этап — формальное описание моделируемого конфликта. Для этого предлагается использовать метод описания параллельных развивающихся стохастических процессов, который может рассматриваться как модификация математического аппарата теории сетей Петри [7]. Методика построения модели предполагает представление процесса конфликтного взаимодействия динамической сетевой структурой, образованной из подсетей (сепарантов), описывающих функционирование подсистем конфликтующих систем и связанных между собой управляемыми переходами.

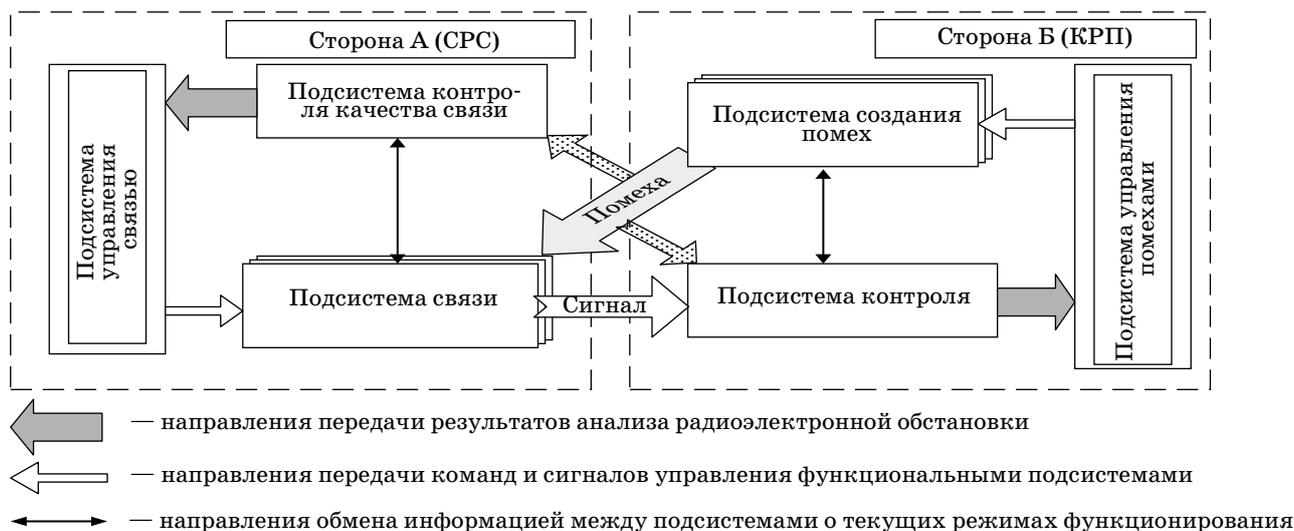
Построение модели конфликта включает следующие основные формальные логико-математические операции:

— *агрегирование процесса конфликта* — разбиение моделируемых конфликтующих систем в соответствии с их структурой на функциональные подсистемы с последующим представлением процесса функционирования каждой подсистемы в виде динамических стохастических подсетей (графов), состоящих из конечного числа дискретных состояний, в соответствии с логикой функционирования моделируемых подсистем;

— *структурную композицию модели конфликта* — объединение всех описывающих функциональные подсистемы конфликтующих сторон подсетей в единую сетевую структуру типа сети Петри с управляемыми переходами, а также задание определенной логики и параметров срабатывания управляемых переходов связанных друг с другом подсетей;

— *настройку модели конфликта* — логико-структурный анализ и коррекцию параметров модели в процессе имитации динамики функционирования подсистем с целью достичь соответствия поведения полученной модели поведению моделируемой системы в целом. Имитация функционирования заключается в установке индикаторов активности запускающих состояний и переходов сети в состояние активности (начальная разметка) и дальнейшем перемещении этих индикаторов по сети с течением модельного времени в соответствии с логикой срабатывания управляемых переходов и структурой сети до момента достижения ими состояния конечной разметки.

В результате проведенного анализа вариантов выполнения операции агрегирования процесса



■ Рис. 1. Обобщенная схема конфликта «СРС—КРП»

радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП», описываемого обобщенной моделью на рис. 1, была получена совокупность подсетей, которые описывают функционирование подсистем конфликтующих сторон и представлены в виде структурных схем в таблице.

Все состояния приведенных в таблице подсетей соответствуют определенным процессам или событиям, происходящим при функционировании моделируемой подсистемы, представленной средствами СРС или КРП. Выбор совокупности таких состояний и их смыслового содержания на начальном этапе агрегирования процесса конфликта осуществляется исследователем на основе сложившегося у него представления об алгоритме функционирования объектов моделирования, знания присущих этим объектам свойств, характеристик и особенностей поведения. На этом этапе необходимо стремиться к наиболее полному и подробному описанию состояний моделируемых подсистем и представлению их в соответствующих подсетях, учитывая даже незначительные на первый взгляд детали. Отсев «лишней» информации, привлекаемой для формирования подсетей, будет осуществляться естественным путем в процессе последующих этапов структурной композиции и настройки модели конфликта.

Состояния подсетей связываются переходами различных типов в соответствии с логикой поведения моделируемого объекта, а также объектов, оказывающих на него прямое или косвенное влияние. Каждый такой переход обеспечивает функцию перемещения индикатора активности состояний из одного состояния в другое при условии выполнения присвоенного этому переходу логического правила (логической функции). В область

определения логического правила (функции) перехода могут входить значения активностей состояний и переходов исходной подсети и взаимодействующих с ней подсетей, а также текущее состояние и значения основных используемых параметров модели, например модельное время.

Все многообразие переходов синтезируемых подсетей может быть построено с использованием следующих семи базовых типов переходов γ_{ij}^k из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети.

1. Ординарный переход:

$$\gamma_1 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } r_i^k = 1; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $r_i^k \in \{0, 1\}$ — индикатор активности i -го состояния (управляющего) для k -й подсети.

2. Множественный переход:

$$\gamma_2 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } R_{ij}^k \in \tilde{R}(t_m); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где R_{ij}^k — разметка множества состояний общей модели, разрешающая переход из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети; $\tilde{R}(t_m)$ — текущая разметка множества активных состояний общей модели; t_m — текущее модельное время.

3. Детерминированный замедляющий переход:

$$\gamma_3 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } (r_i^k = 1) \& (\Delta t_i^k \geq \Delta_{ij}^k); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где Δt_i^k — продолжительность активности i -го состояния k -й подсети; Δ_{ij}^k — интервал времени замедления, необходимый для перехода из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети.

■ Перечень подсетей модели конфликта «СРС—КРП»

Название подсистемы	Структурная схема подсети	Состав состояний подсети
Подсистема создания помех		<p>S_{11} — исходное состояние S_{12} — режим ожидания (пауза для работы подсистемы контроля) S_{13} — режим постановки помех (подавления)</p>
Подсистема контроля		<p>S_{21} — исходное состояние S_{22} — контроль излучений S_{23} — обнаружение факта связи S_{24} — подтверждение эффективности подавления S_{25} — определение параметров связи S_{26} — параметры связи не определены S_{27} — обнаружение факта принятия мер помехозащиты S_{28} — факт связи не обнаружен</p>
Подсистема управления помехами		<p>S_{31} — исходное состояние S_{32} — анализ результатов контроля излучений и принятие решения на подавление S_{33} — принятие правильного решения по подавлению связи S_{34} — принятие неправильного решения по подавлению связи S_{35} — оставить предыдущее решение по подавлению связи без изменений S_{36} — решение не подавлять связь</p>
Подсистема связи		<p>S_{41} — исходное состояние S_{42} — передача информации S_{43} — информация передана (финальное состояние) S_{44} — передача информации невозможна вследствие действия помех S_{45} — принимаются меры помехозащиты</p>
Подсистема контроля качества связи		<p>S_{51} — исходное состояние S_{52} — контроль излучений S_{53} — обнаружение факта помех S_{54} — качество связи нормальное S_{55} — параметры помех определены S_{56} — параметры помех не определены S_{57} — контроль принимаемых мер помехозащиты</p>

■ Окончание таблицы

Название подсистемы	Структурная схема подсети	Состав состояний подсети
Подсистема управления связи	<pre> graph TD S61((S61)) -- P61 --> S62((S62)) S62 -- P62 --> S63((S63)) S63 -- P63 --> S64((S64)) S64 -- P64 --> S65((S65)) S65 -- P65 --> S61 S65 -- P66 --> S61 S65 -- P67 --> S61 S61 -- P68 --> S63 </pre>	<p>S_{61} — исходное состояние S_{62} — анализ результатов контроля излучений и оценка помеховой обстановки S_{63} — решение принять правильные меры помехозащиты S_{64} — решение принять ошибочные меры помехозащиты S_{65} — оставить предыдущее решение по мерам помехозащиты</p>

4. Стохастический замедляющий переход — аналогичен детерминированному замедляющему переходу, но временной параметр перехода является случайной величиной и имеет закон распределения W с параметрами $d_i(t_m)$, $i = 1, 2, \dots, n$:

$$\gamma_4 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } (r_i^k = 1) \& (\Delta t_i^k \geq \tilde{\Delta}_{ij}^k(W[d_1(t_m), \\ & d_2(t_m), \dots, d_n(t_m)])); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $\tilde{\Delta}_{ij}^k(W[x])$ — случайный временной параметр перехода из i -го состояния в j -е состояние для k -й подсети с законом распределения $W[x]$. В общем случае ограничения на вид закона распределения не накладываются, а его функция распределения вероятностей может быть задана аналитически.

5. Параметрический переход:

$$\gamma_5 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } F(\mathbf{D}(t_m), \Delta t_i^k) \geq d_{ij}^k(t_m); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $F(\mathbf{D}(t_m), \Delta t_i^k)$ — некоторая функциональная зависимость от вектора параметров модели $\mathbf{D}(t_m)$ и длительности активности i -го состояния в k -й подсети Δt_i^k ; $d_{ij}^k(t_m)$ — заданный параметр параметрического перехода.

6. Синхронизирующий переход:

$$\gamma_6 = \gamma_{ij}^k = F_{ij}^k(\Gamma_A, \tilde{R}(t_m)),$$

где $F_{ij}^k(\Gamma_A, \tilde{R}(t_m))$ — некоторая булева функция для i -го и j -го состояний k -й подсети, в качестве аргументов которой выступают текущая активная разметка общей модели $\tilde{R}(t_m)$ и множество активных переходов Γ_A , для которых выполнены условия запускающей разметки.

7. Вложенный переход:

$$\gamma_7 = \gamma_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } (r_i^k = 1) \& (r^\xi = 1); \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где r^ξ — финальное состояние некоторой произвольной подсети ξ , определяющей функциональную взаимосвязь i -го и j -го состояний k -й подсети.

Анализ приведенных типов переходов показывает, что часть из них ($\gamma_1, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_7$) предназначена для автономного функционирования обособленных подсетей, так как областью их определения являются только «внутренние» характеристики и свойства моделируемых подсистем. Другая же часть ($\gamma_2, \gamma_5, \gamma_6$), напротив, содержит ссылки на характеристики, свойства и поведение смежных подсетей моделируемых подсистем и выступает в качестве основных соединительных элементов объединенной модели исследуемой сложной системы при реализации параметрической и структурной композиции ее отдельных подсистем. Исходя из этого сущность этапа структурной композиции модели конфликта можно определить как объединение подсетей в сетевую структуру типа сети Петри с выбором (подбором) параметров переходов типа ($\gamma_2, \gamma_5, \gamma_6$) в каждой из имеющихся подсетей. На последующем этапе настройки параметров модели конфликта происходит уточнение параметров переходов подсетей как первого ($\gamma_1, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_7$), так и второго ($\gamma_2, \gamma_5, \gamma_6$) типа.

Таким образом, второй этап исследования включает реализацию двух процедур: создания требуемого множества частных моделей подсистем в виде графовых форм (подсетей) и композиции полученных графовых форм (подсетей) в единую сетевую структуру модели путем задания требуемых типов и параметров переходов.

Третий этап — разработка на основе сформированной модели программы моделирования на ЭВМ (программной модели), уточнение этой программы и самой модели в процессе предваритель-

ного изучения характера ее поведения при типовых исходных данных и проведение численных расчетов (экспериментов) на ЭВМ с помощью созданной программы.

Численные эксперименты при исследовании с помощью разработанной программы радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП» рекомендуется проводить в следующей последовательности:

1) формируются наборы исходных данных, содержащих динамические и статические характеристики моделируемых процессов функционирования СРС и КРП;

2) путем выбора характеристик и состава структурных компонентов модели задаются различные способы применения КРП и различные способы организации связи в СРС в условиях отсутствия и воздействия преднамеренных помех;

3) осуществляется предварительный прогон модели в условиях отсутствия преднамеренных помех в целях определения эталонных значений параметров моделируемой СРС;

4) назначается количество прогонов модели в условиях воздействия преднамеренных помех, создаваемых КРП для подавления моделируемой СРС;

5) проводится назначенное число прогонов модели в условиях воздействия преднамеренных помех;

6) производится статистическая обработка выборок, полученных в результате всех прогонов модели;

7) проводится анализ результатов обработки полученных выборок.

Пример разработки модели радиоэлектронного конфликта системы радиосвязи и комплекса радиопротиводействия

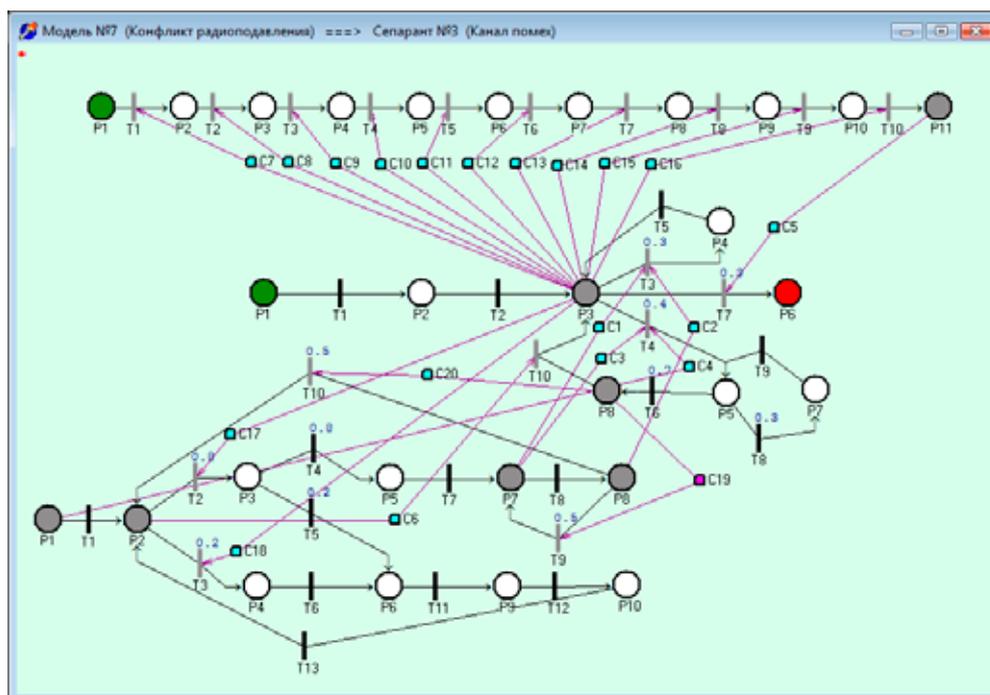
В качестве основного исследуемого параметра при моделировании радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП» было выбрано время задержки T_3 передачи в СРС в ходе сеанса связи типового сообщения фиксированного объема, рассчитываемое по формуле

$$T_3 = T_c - T_{c0}, \quad (1)$$

где T_c — длительность сеанса связи в условиях действия преднамеренных помех; T_{c0} — стандартная длительность сеанса связи в отсутствие помех.

В соответствии с рассмотренным математическим аппаратом на языке Delphi была разработана программная модель конфликта «СРС—КРП». Интерфейс программной модели в одном из режимов работы показан на рис. 2.

При моделировании сеансов связи использовался метод статистических испытаний Монте-Карло. Величина стандартной длительности сеанса связи T_{c0} определялась как эталонный параметр по результатам прогона модели в условиях отсутствия преднамеренных помех и полагалась



■ Рис. 2. Интерфейс программной модели конфликта «СРС—КРП»

постоянной. В процессе моделирования были получены выборки случайной величины T_c , по которым методами статистической обработки определялись вид и параметры законов распределения случайной величины T_3 . Вид законов распределения определялся по выборке ограниченного объема с помощью методики топографической идентификации [10], в соответствии с которой для идентификации класса закона распределения выборки достаточно вычислить энтропийный коэффициент и контрэксцесс выборки.

Анализ результатов моделирования, проведенного с использованием разработанной программной модели конфликта, показал, что для случайной величины $x=T_3$ наиболее статистически близким явилось гамма-распределение с параметрами $\alpha \geq 0$ и $\lambda \geq 0$:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Gamma(\alpha)$ — гамма-функция.

Моделирование показало близкую к прямо пропорциональной зависимость математического ожидания времени задержки передаваемого сообщения в условиях помех от параметра α закона распределения (2) даже при значительных изменениях величины λ , что иллюстрирует рис. 3, на котором приведены полигоны распределения выборок случайной величины $x=T_3$ [мин] для различных значений параметров модели (α и λ).

Анализ поведения параметра α при вариации исходных данных показал практически линейную зависимость этого параметра от отношения среднего времени реакции подавляемой линии связи $\bar{\tau}_c$ к среднему времени реакции канала помех $\bar{\tau}_\Pi$:

$$\alpha \approx a \frac{\bar{\tau}_c}{\bar{\tau}_\Pi}. \quad (3)$$

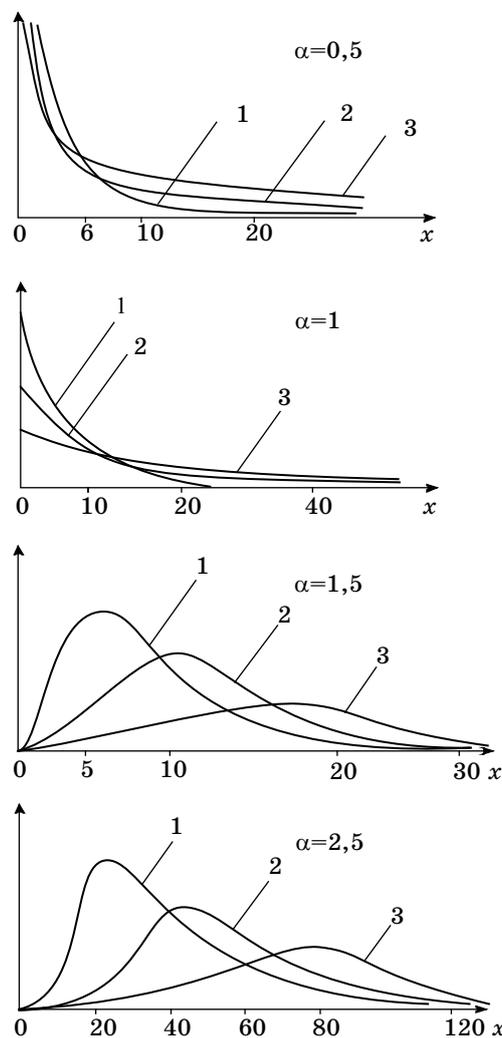
Анализ поведения параметра λ для разных наборов исходных данных модели показал обратно пропорциональную зависимость этого параметра от средней продолжительности сеанса связи в условиях отсутствия помех:

$$\lambda \approx b \frac{1}{T_{c0}}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) a и b — коэффициенты пропорциональности.

С учетом вида функции (2) и формул (3) и (4) математическое ожидание времени задержки T_3 может быть записано в следующем виде:

$$\bar{x} = \bar{T}_3 = \frac{\alpha}{\lambda} \approx \bar{T}_{c0} \frac{\bar{\tau}_c}{\bar{\tau}_\Pi} \frac{a}{b}. \quad (5)$$



■ Рис. 3. Полигоны распределений $f(x)$, полученных в результате моделирования выборок времени задержки для различных значений параметров гамма-распределения: 1 — $\lambda=0,1$; 2 — $\lambda=0,05$; 3 — $\lambda=0,025$

Последующий анализ результатов моделирования с привлечением дополнительных учитываемых факторов, таких как P_c — вероятность ошибки управления подсистемой связи в условиях помех, P_Π — вероятность ошибки управления подсистемой создания помех в условиях принятия подсистемой управления связью мер помехозащиты, β — отношение средней пропускной способности линии связи в условиях помех к аналогичной характеристике в условиях отсутствия помех, позволил уточнить вид и параметры выражения (5) для математического ожидания времени задержки T_3 .

Окончательный вид аналитического представления математического ожидания времени задержки по результатам моделирования:

$$\bar{x} = \bar{T}_3 = \bar{T}_{c0} \times \left(\frac{a' \bar{\tau}_c (1-\beta)(1+P_c)(1-P_{\Pi})^{\gamma_{\Pi}}}{\bar{\tau}_{\Pi} (1-P_c)^{\gamma_c} (1+P_{\Pi}) + \bar{\tau}_c \beta (1+P_c)(1-P_{\Pi})^{\gamma_{\Pi}} + b'(1-\beta)} \right), \quad (6)$$

где $\gamma_{\Pi} = \frac{\bar{\tau}_{\Pi}}{(\bar{\tau}_{\Pi} + \bar{\tau}_c)}$; $\gamma_c = \frac{\bar{\tau}_c}{(\bar{\tau}_{\Pi} + \bar{\tau}_c)}$; a' и b' — коэффициенты пропорциональности, позволяющие адаптировать выражение (6) для различных СРС и видов связи (в частности, для телефонии авто-

рамами найдены следующие значения: $a' = 0,6$; $b' = 0,1$; для телеграфии: $a' = 0,8$; $b' = 0,01$.

Выражение (6) учитывает все основные характеристики конфликтующих систем и отражает характер их влияния на показатель эффективности функционирования КРП. Использование выражения (6) на практике позволяет достаточно просто и с точностью не хуже 5—10 % по сравнению с экспериментальными данными решать задачи обоснования требований к наиболее важным характеристикам КРП, используемых для подавления СРС, или наоборот, требований к СРС при условии их функционирования в различной помеховой обстановке, в том числе при воздействии КРП.

Применение предложенного математического аппарата позволяет разрабатывать формальные модели сложных систем без значительного увеличения размерности, что является одной из проблем исследования больших технических систем. Мету такого выигрыша можно продемонстрировать на рассмотренном примере модели радиоэлектронного конфликта «СРС—КРП». Число используемых для расчетов состояний в сетевой структуре модели оценивается величиной $N_1 = 3 + 8 + 6 + 5 + 7 + 5 = 34$ (здесь каждое слагаемое соответствует числу состояний подсетей, приве-

денных в таблице). Для сравнения: для построения аналогичной по своим описательным возможностям модели с использованием аппарата марковских (полумарковских) процессов [6] требуется исследовать стохастическую сеть с числом состояний не менее $N_2 = 3 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 5 = 25\,200$ (здесь множителям также соответствуют числа состояний подсетей, приведенных в таблице). Несмотря на оценочный характер полученных значений N_1 и N_2 , очевидно, что для них всегда выполняется соотношение $N_1 \ll N_2$.

Заключение

Предложенный подход к моделированию процесса функционирования конфликтующих систем на основе методологии описания параллельных развивающихся стохастических процессов за счет введения управляемых переходов между подсетями позволяет добиться значительного уменьшения влияния на конечный результат ошибок декомпозиции исследуемой системы на подсистемы, в том числе при описании систем с многоуровневой иерархической структурой и распределенной активностью подсистем.

Рассмотренная методология ориентирована на применение данного подхода для моделирования сложных радиотехнических систем, функционирующих в условиях радиоэлектронного конфликта. При этом основные приемы и формальные логико-математические операции (агрегирование процесса конфликта, структурная композиция модели конфликта и настройка модели конфликта) достаточно структурированы, что позволяет их алгоритмизировать и использовать при разработке универсальных интеллектуальных систем автоматизированного проектирования моделей сложных систем для решения широкого класса исследовательских задач.

Литература

1. Дружинин В. В., Конторов Д. С., Конторов М. Д. Введение в теорию конфликта. — М.: Радио и связь, 1989. — 288 с.
2. Куприянов А. И., Сахаров А. В. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. — М.: Вузовская книга, 2003. — 528 с.
3. Рыжиков Ю. И. Имитационное моделирование: Теория и технологии. — М.: Альтекс, 2004. — 384 с.
4. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002. — 608 с.
5. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем: пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 344 с.

6. Протасов И. Д. Теория игр и исследования операций. — М.: Гелиос АРВ, 2006. — 342 с.
7. Вирбицкайте И. Б. Сети Петри: модификации и расширения. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 2005. — 123 с.
8. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. — М.: Вузовская книга, 2011. — 800 с.
9. Борисов В. И., Зинчук В. М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. — М.: РадиоСофт, 2008. — 260 с.
10. Карманов Ф. И., Острейковский В. А. Статистические методы обработки экспериментальных данных. — М.: Высш. шк., 2012. — 208 с.

УДК 519.651

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ АВТОРЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ИНФОРМАЦИОННОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ КУЛЬБАКА — ЛЕЙБЛЕРА

И. В. Губочкин,

канд. техн. наук, доцент

Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н. А. Добролюбова

Н. В. Карпов,

канд. техн. наук, доцент

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Нижний Новгород

Решается задача кластеризации множества авторегрессионных моделей речевых сигналов в рамках теоретико-информационного подхода. Для этого был разработан алгоритм нахождения оптимальных параметров авторегрессионной модели в смысле минимума информационного рассогласования Кульбака — Лейблера. На его основе проведена модификация известного алгоритма кластеризации k -средних. Экспериментально исследована эффективность применения разработанных алгоритмов при дикторонезависимом распознавании изолированных слов с использованием аппарата скрытых марковских моделей с дискретным распределением вероятностей наблюдений. Установлено, что наилучшие результаты по точности распознавания достигаются при использовании коэффициентов линейного предсказания с неравномерным частотным разрешением в качестве вектора признаков и размере кодовой книги векторного квантователя, равном 256.

Ключевые слова — автоматическое распознавание речи, авторегрессионная модель, информационное рассогласование, центроид, кластер.

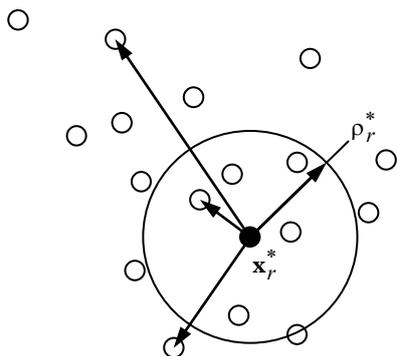
Введение

В исследованиях по информационной теории восприятия речи (ИТВР) [1–5] предложены подходы к решению задач анализа, распознавания и обработки речевых сигналов в рамках теоретико-информационного подхода. Данная тематика исследований является весьма актуальной по причине широкого распространения в последнее время теоретико-информационного подхода в теории распознавания образов. Так, в работе [6] проводится оценка и дается обоснование возможности применения указанного подхода для кластеризации данных. В работах [7, 8] рассматриваются примеры использования различных видов информационных метрик при решении задач обработки изображений. Работы [9–11] посвящены применению теоретико-информационного подхода и информационной геометрии в различных методах машинного обучения.

В связи с этим вызывает интерес адаптация подходов, представленных в ИТВР, к использованию в уже существующих методах машинного обучения и распознавания образов применительно к задаче кластеризации и обработки речевых сигналов. Для этого рассмотрим вначале основные положения данной теории.

В рамках ИТВР элементарная речевая единица (ЭРЕ) задается некоторым информационным центром-эталонном, в качестве которого выбирается реализация речевого сигнала $\mathbf{x}_r \in \{\mathbf{x}\}_r$, $r = \overline{1, R}$, представленная соответствующей авторегрессионной (АР) моделью и характеризующаяся минимальной суммой информационных рассогласований в метрике Кульбака — Лейблера [1, 5, 12] относительно всех других реализаций данной ЭРЕ:

$$\mathbf{x}_r^* = \arg \min_k \sum_{\ell=1}^{L_r} \rho_{\ell, k}, k = \overline{1, L_r}, \quad (1)$$



■ Рис. 1. Модель ЭРЕ

где L_r — число реализаций r -й ЭРЕ; $\rho_{l,k}$ — информационное рассогласование по Кульбаку — Лейблеру между l -й и k -й ЭРЕ. Иллюстрирует сформулированное выше определение модели ЭРЕ [1] рис. 1.

В приведенной формулировке модели ЭРЕ есть два недостатка. Первый заключается в том, что выбор информационного центра-эталона делается из дискретного множества реализаций. Это значит, что критерий (1) не является в строгом смысле оптимальным. Второй недостаток состоит в переборном характере алгоритма поиска информационного центра-эталона, сложность которого составляет $O(L_r^2)$, т. е. количество необходимых вычислений будет быстро возрастать с увеличением множества реализаций заданной ЭРЕ. В связи с этим представляется актуальным создание алгоритмов, свободных от указанных недостатков.

Постановка задачи нахождения оптимальной авторегрессионной модели

Согласно работе [2], информационное рассогласование по Кульбаку — Лейблеру между неизвестным сигналом x и эталоном r , заданными их АР-моделями, определяется в спектральной области следующим образом:

$$\rho_{x,r} = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \frac{\left| 1 + \sum_{m=1}^P a_r(m) e^{-j\pi m f / F} \right|^2}{\left| 1 + \sum_{m=1}^P a_x(m) e^{-j\pi m f / F} \right|^2} - 1. \quad (2)$$

Здесь P — порядок АР-модели; $a_r(m)$ и $a_x(m)$ — элементы векторов авторегрессии сигналов r и x соответственно; F — верхняя граница частотного диапазона. Можно показать [13], что $\rho_{x,r} \geq 0$ для любых АР-моделей $a_r(m)$ и $a_x(m)$, если их полюсы находятся внутри единичной окружности на комплексной плоскости.

Отметим также, что информационное рассогласование Кульбака — Лейблера является частным случаем рассогласования Брэгмана [14], определяемого между двумя функциями плотности распределения вероятностей $p(x)$ и $q(x)$ как

$$D_F(p||q) = F(p) - F(q) - \int \frac{dF(q)}{dq} (q(x) - p(x)) dx, \quad (3)$$

где $F(\bullet)$ — производящая функция, обладающая свойствами выпуклости и дифференцируемости. Собственно само информационное рассогласование Кульбака — Лейблера легко получить из (3), выбрав в качестве производящей функции негэнтропию Шеннона $F(x) = \int x \log x dx$. Отсюда следует, что информационное рассогласование (2) также относится к классу рассогласований Брэгмана. Приведенное замечание будет использовано далее при доказательстве сходимости модифицированного алгоритма кластеризации k -средних.

Определим теперь информационное рассогласование Кульбака — Лейблера в случае сравнения эталонного сигнала, заданного его АР-моделью, сразу с множеством реализаций r -й ЭРЕ $\{x\}_r$ как величину среднего искажения:

$$\rho_{\{x\}_r,r} = \frac{1}{L_r F} \times \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{\left| 1 + \sum_{m=1}^P a_r(m) e^{-j\pi m f / F} \right|^2}{\left| 1 + \sum_{m=1}^P a_{x,\ell}(m) e^{-j\pi m f / F} \right|^2} - 1, \quad (4)$$

где $a_{x,\ell}(m)$ — элементы вектора авторегрессии l -го сигнала из множества $\{x\}_r$. Вид данной формулы вытекает из определения центраида множества.

Центроидом множества $\{q\}_1^L = \{q_i, i = 1, L\}$ является такой вектор y , который минимизирует среднее искажение:

$$y = \arg \min_y \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d(q_i, y), \quad (5)$$

где d обозначает некоторую меру расстояния между двумя векторами, называемую также мерой искажений [15]. Формула (5) во многом похожа на критерий (1), за исключением того, что получаемый вектор y не обязан соответствовать какому-либо конкретному элементу множества $\{q\}$.

Задача поиска оптимальной АР-модели r -й ЭРЕ состоит в выборе такого вектора АР-коэффициентов a_r^* , при котором величина $\rho_{\{x\}_r,r}$ стремится к своему глобальному минимуму:

$$\rho_{\{x\}_r,r} \Big|_{a_r^*} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Из (5) нетрудно видеть, что решение поставленной задачи в формулировке (4), (6) фактически сводится к поиску АР-модели центроида множества $\text{centr}(\{\mathbf{x}\}_r) \rightarrow \mathbf{a}_r^*$.

Поскольку применяемая в данной работе мера расстояния между векторами (2) с учетом свойств рассогласования Кульбака — Лейблера не является симметричной, то, согласно работе [7], формула (5) определяет «правосторонний» центроид. Выбор центроида данного типа обусловлен возможностью получить эффективный алгоритм его вычисления, описание которого приводится далее.

Синтез алгоритма

Найдем решение задачи (6). Для этого нам необходимо решить относительно \mathbf{a}_r простую систему дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial \rho_{\{\mathbf{x}\}_r, r}}{\partial a_r(m)} = 0, \quad m = \overline{1, P}. \quad (7)$$

Получим выражение для частной производной $\frac{\partial \rho_{\{\mathbf{x}\}_r, r}}{\partial a_r(m)}$. Для этого определим две функции:

$$N_r(f) = \left| 1 + \sum_{m=1}^P a_r(m) e^{-j\pi m f / F} \right|^2;$$

$$D_{x, \ell}(f) = \left| 1 + \sum_{m=1}^P a_{x, \ell}(m) e^{-j\pi m f / F} \right|^2.$$

Тогда формулу (4) можно переписать следующим образом:

$$\rho_{\{\mathbf{x}\}_r, r} = \frac{1}{L_r F} \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{N_r(f)}{D_{x, \ell}(f)} - 1. \quad (8)$$

Выражение (8) легко преобразовать к матричному виду, определив такую матрицу $\mathbf{G}_{\{\mathbf{x}\}_r, r}$ и вектор-строку \mathbf{N}_r , что

$$\mathbf{N}_r = [N_r(f)];$$

$$\mathbf{G}_{\{\mathbf{x}\}_r, r} = \begin{bmatrix} \frac{1}{D_{x,1}(1)} & \cdots & \frac{1}{D_{x,1}(F)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{D_{x,L_r}(1)} & \cdots & \frac{1}{D_{x,L_r}(F)} \end{bmatrix}.$$

Отсюда получаем

$$\rho_{\{\mathbf{x}\}_r, r} = \frac{1}{L_r F} \mathbf{I}(\mathbf{G}_{\{\mathbf{x}\}_r, r} \cdot \mathbf{N}_r^T) - 1, \quad (9)$$

где \mathbf{I} — единичный вектор-строка размера $1 \times L_r$.

Можно показать [16], что частная производная $\frac{\partial N_r(f)}{\partial a_r(m)}$ определяется как

$$\frac{\partial N_r(f)}{\partial a_r(m)} = 2 \left(a_r(m) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^P a_r(n) \Xi(m, n, f) + \cos\left(\frac{\pi m f}{F}\right) \right), \quad (10)$$

$$\Xi(m, n, f) = \cos\left(\frac{\pi m f}{F}\right) \cos\left(\frac{\pi n f}{F}\right) + \sin\left(\frac{\pi m f}{F}\right) \sin\left(\frac{\pi n f}{F}\right) = \cos\left(\frac{\pi(m-n)f}{F}\right).$$

Тогда выражение для $\frac{\partial \rho_{\{\mathbf{x}\}_r, r}}{\partial a_r(m)}$ с учетом (8) и (10) приобретает вид

$$\frac{\partial \rho_{\{\mathbf{x}\}_r, r}}{\partial a_r(m)} = \frac{1}{L_r F} \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{1}{D_{x, \ell}(f)} \frac{\partial N_r(f)}{\partial a_r(m)}.$$

Отсюда легко видеть, что уравнение (7) после группировки множителей будет представлено следующим образом:

$$a_m \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{1}{D_{x, \ell}(f)} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^P a_n \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{\Xi(m, n, f)}{D_{x, \ell}(f)} + \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{\cos(\pi m f / F)}{D_{x, \ell}(f)} = 0,$$

$$m = \overline{1, P}.$$

В этом случае решение уравнения (7) относительно \mathbf{a}_r может быть представлено как система линейных уравнений вида

$$\mathbf{C} \mathbf{a}_r = -\mathbf{b}, \quad (11)$$

где \mathbf{b} — вектор-столбец, элементы которого определяются как

$$b_m = \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{\cos(\pi m f / F)}{D_{x, \ell}(f)}, \quad m = \overline{1, P}; \quad (12)$$

\mathbf{C} — квадратная матрица размера $P \times P$, элементы которой задаются следующим выражением:

$$C_{m, n} = \begin{cases} \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{1}{D_{x, \ell}(f)}, & m = n; \\ \sum_{\ell=1}^{L_r} \sum_{f=1}^F \frac{\Xi(m, n, f)}{D_{x, \ell}(f)}, & m \neq n, \end{cases} \quad (13)$$

$$m, n = \overline{1, P}.$$

Преобразовав выражения (12) и (13) в матричный вид, получаем

$$\mathbf{b}_m = \mathbf{I}(\mathbf{G}_{\{\mathbf{x}\}_r, r} \cdot \mathbf{S}_m^T);$$

$$\mathbf{C}_{m,n} = \begin{cases} \mathbf{I}(\mathbf{G}_{\{\mathbf{x}\}_r, r} \cdot \mathbf{E}), & m = n; \\ \mathbf{I}(\mathbf{G}_{\{\mathbf{x}\}_r, r} \cdot \mathbf{\Xi}_{m,n}^T), & m \neq n, \end{cases} \quad (14)$$

где \mathbf{E} — матрица размера $F \times L_r$, состоящая из единичных элементов, а \mathbf{S}_m и $\mathbf{\Xi}_{m,n}$ — векторы-строки, которые определяются как

$$\mathbf{S}_m = \left[\cos\left(\frac{\pi m f}{F}\right) \right]; \quad \mathbf{\Xi}_{m,n} = [\Xi(m, n, f)].$$

Интересной особенностью уравнения (11) является то, что оно по своей структуре сходно с известными уравнениями Юла — Уолкера [17], для которых существует быстрый алгоритм решения. В матричной форме данные уравнения задаются в виде

$$\begin{bmatrix} r_1 & \bar{r}_2 & \dots & \bar{r}_P \\ r_2 & r_1 & \dots & \bar{r}_{P-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_P & r_{P-1} & \dots & r_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_2 \\ -r_3 \\ \vdots \\ -r_{P+1} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где r_i — соответствующий элемент некоторого вектора \mathbf{r} размерности $P+1$ (в оригинале \mathbf{r} — вектор автокорреляции), а обозначение \bar{r}_i является операцией комплексного сопряжения. Для того чтобы свести уравнение (11) к виду (15), необходимо задать вектор \mathbf{r} в виде $\mathbf{r} = [\mathbf{C}_1 \ b_P]$, где \mathbf{C}_1 — первая строка матрицы \mathbf{C} .

Для быстрого решения (15) обычно применяется рекуррентный алгоритм Левинсона — Дарбина [18], шаги которого приведены ниже:

$$E^{(0)} = r_1;$$

$$k_i = \left\{ r_{i+1} - \sum_{j=2}^i \alpha_j^{(i-1)} r_{i-j} \right\} / E^{(i-1)}, \quad 1 \leq i \leq P; \quad (16)$$

$$\alpha_i^{(i)} = k_i; \quad \alpha_j^{(i)} = \alpha_j^{(i-1)} - k_i \alpha_{i-j}^{(i-1)};$$

$$E^{(i)} = (1 - k_i^2) E^{(i-1)};$$

$$a_m = \alpha_m^{(P)}, \quad 1 \leq m \leq P.$$

Результатом его работы является вычисление вектора АР-коэффициентов без необходимости непосредственного обращения автокорреляционной матрицы.

Вычисления по алгоритму (11) — (16) позволяют получить значения коэффициентов АР-модели ЭРЕ \mathbf{a}_r , которые являются оптимальным

решением задачи (6). Особенностью данного решения является то, что оно всегда будет оптимальным в глобальном смысле, поскольку величина среднего информационного рассогласования в виде (4) является квадратичной формой относительно \mathbf{a}_r . Также легко видеть, что предложенный алгоритм имеет линейную сложность $O(L_r)$, в отличие от критерия (1).

Модифицированный алгоритм k -средних

Наглядным примером практического применения полученного алгоритма (11) — (16) решения задачи (6) может служить использование его при построении алгоритмов кластеризации без учителя. Одним из наиболее известных алгоритмов такого типа является алгоритм k -средних [19, 20]. В общем виде он может быть задан следующим образом [21].

Пусть мы имеем некоторую случайную величину в пространстве наблюдений \aleph такую, что $X: \mathbf{x} \in \aleph \subset \mathcal{R}^d$, где \mathcal{R}^d — d -мерное евклидово пространство. Нас интересует возможность разбиения пространства \aleph на Γ кластеров. Алгоритм k -средних предполагает, что число кластеров Γ заранее известно, и требуется найти такую матрицу параметров Φ , которая бы минимизировала целевую функцию (ошибку квантования), заданную следующим выражением:

$$E(X, \Phi) \approx E_{KM}(\{\mathbf{x}\}_1^L, \Phi) = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \min_{\gamma} d(x_{\ell}, \varphi_{\gamma}) = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \min_{\gamma} \|\mathbf{x}_{\ell} - \varphi_{\gamma}\|^2. \quad (17)$$

Здесь $\{\mathbf{x}\}_1^L$ — множество векторов наблюдений; φ_{γ} — γ -й столбец матрицы Φ , который представляет собой вектор параметров, связанный с кластером γ .

При кластеризации по алгоритму k -средних вектор параметров φ_{γ} представляет собой обычное среднее значение всех векторов наблюдений, входящих в кластер γ . В этом случае мы можем определить матрицу средних значений \mathbf{M} , каждый γ -й столбец которой является вектором параметров φ_{γ} . Отсюда можно записать, что

$$\varphi_{\gamma} = \hat{\mu}_{\gamma}; \quad \Phi = \mathbf{M},$$

где $\hat{\mu}_{\gamma}$ — оценка среднего значения элементов γ -го кластера.

Для случая, когда наблюдения представлены в виде векторов авторегрессии $\{\mathbf{a}\}_1^L$ в метрике (2), необходимо внести в рассматриваемый алгоритм кластеризации изменения, касающиеся целевой функции (17) и меры искажений d . Возможность таких изменений связана с тем, что алгоритм k -средних может использоваться с широким

классом мер искажений, включая меры, не являющиеся метрическими [22]. Сходимость рассматриваемого алгоритма гарантируется для любых мер искажений, которые относятся к классу информационных расогласований Брэгмана [6]. Как было отмечено выше, информационное расогласование (2) также относится к данному классу. Из сказанного следует, что алгоритм k -средних сходится при использовании (2) в качестве меры искажений.

Ниже представлены шаги модифицированного алгоритма.

1. Выбрать число кластеров Γ , инициализировать оценки центроидов $\mathbf{a}_\gamma^{*(k)}$, $k=0$, по каждому кластеру $\mathcal{N}_\gamma^{(k)}$, $k=0$, используя значения, полученные на основе априорных данных, или случайные значения. Затем на основе этих параметров, обозначенных как $\phi_\gamma^{(k)}$, $k=0$, формируется матрица $\Phi^{(k)}$, $k=0$.

2. С учетом текущих определений кластеров $\mathcal{N}_\gamma^{(k)}$ распределить по каждому из них имеющиеся АР-модели векторов наблюдений \mathbf{a}_ℓ , $\ell=1, L$, используя следующую индексную функцию принадлежности:

$$\hat{\gamma}_{\ell k} = \rho(\mathbf{a}_\ell, \Phi^{(k)}) = \arg \min_{\gamma} \rho_{\ell, \gamma}.$$

Вычисление значений информационного расогласования $\rho_{\ell, \gamma}$ в формулировке (2) можно также выполнять в матричном виде аналогично (9) и (14).

3. Вычислить целевую функцию с учетом распределения наблюдений по кластерам

$$E_{KM}^{(k)} = E_{KM}(\{\mathbf{a}_\ell\}_1^L, \Phi^{(k)}) = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \rho_{\ell, \hat{\gamma}_{\ell k}}. \quad (18)$$

4. Вычислить изменение целевой функции

$$\delta^{(k)} = E_{KM}^{(k)} - E_{KM}^{(k-1)}.$$

Алгоритм завершает свою работу, если выполняется условие $\left((k > 0 \wedge \delta^{(k)} \leq \delta_{\min}) \vee (k > 1 \wedge |\delta^{(k)} - \delta^{(k-1)}| < \varepsilon) \right)$ или $k > k_{\max}$.

5. На основе нового распределения векторов наблюдений по кластерам $\mathcal{N}_\gamma^{(k)}$ вычислить значения $\mathbf{a}_\gamma^{*(k+1)}$, используя алгоритм (11)–(16). Из полученных векторов сформировать матрицу параметров $\Phi^{(k+1)}$.

6. Увеличить номер итерации k и повторить вычисления, начиная с шага 2.

Алгоритм k -средних реализует в себе метод наискорейшего спуска вдоль вектора градиента ошибки квантования (18) [23]. Из этого следует,

что на каждой последующей итерации алгоритма значение целевой функции должно уменьшаться. Еще одним свойством данного алгоритма является уменьшение величины ошибки квантования при увеличении числа кластеров.

Разработанные выше алгоритмы могут использоваться в различных областях, в частности, в распознавании речевых сигналов. Результаты такого применения приводятся в следующем разделе.

Результаты экспериментальных исследований

Для проверки эффективности разработанной модификации алгоритма k -средних были проведены его экспериментальные исследования в рамках задачи распознавания изолированных слов. Эксперимент проводился с использованием речевой базы¹, состоящей из $R=11$ слов английского языка: «one», «two»,..., «nine», «zero», «o». Каждое слово проговаривалось в среднем по 2 раза группой из 208 дикторов. Представленная в базе речь хранится в виде соответствующих звуковых файлов формата PCM WAVE с частотой дискретизации 8 кГц, 16 бит. Данные файлы разделены на обучающее и тестовое множество. Обучающее множество содержит речь 95 дикторов (38 мужчин и 57 женщин), всего по 188 реализаций каждого слова. Тестовое множество содержит речь 113 дикторов (56 мужчин и 57 женщин), всего по 225 реализаций каждого слова. Следует отметить, что обучающее и тестовое множества не пересекаются друг с другом по дикторам. Несмотря на некоторую несбалансированность обучающего множества по числу мужчин и женщин, можно говорить о том, что применяемая речевая база в целом является достаточно представительной.

В ходе экспериментальных исследований все реализации слов разбивались на квазистационарные сегменты длительностью 20 мс с перекрытием смежных сегментов в 10 мс. Далее вычислялись векторы признаков размерности $P=12$, описывающих соответствующие сегменты. Для сравнения использовались четыре наиболее широко распространенных вида векторов признаков:

1) коэффициенты линейного предсказания (LPC) [24], которые являются эквивалентом рас-

¹ Обучающее и тестовое множества речевой базы английских числительных доступны для скачивания в сети Интернет по следующим ссылкам: http://cronos.rutgers.edu/~lrr/speech%20recognition%20course/databases/isolated_digits_ti_train_endpt.zip

http://cronos.rutgers.edu/~lrr/speech%20recognition%20course/databases/isolated_digits_ti_test_endpt.zip

смастриваемых в данной работе коэффициентов авторегрессии a ;

2) кепстральные коэффициенты, вычисленные по рекуррентной формуле из коэффициентов линейного предсказания (СС-LPC) [18]:

$$c_m = a_m + \sum_{k=1}^{m-1} \left(\frac{k}{m}\right) c_k a_{m-k}, \quad 1 \leq m \leq P;$$

$$c_m = \sum_{k=1}^{m-1} \left(\frac{k}{m}\right) c_k a_{m-k}, \quad m \geq P; \quad (19)$$

3) коэффициенты линейного предсказания с неравномерным частотным разрешением (WLPC) [25]. Для их вычисления вектор коэффициентов автокорреляции r пропускается через набор всепропускающих фильтров первого порядка следующего вида:

$$D(z) = \frac{z^{-1} - \psi}{1 - \psi z^{-1}}.$$

Здесь $-1 < \psi < 1$ — коэффициент деформации. Параметр ψ выбирается таким образом, чтобы получаемая частотная шкала была близка к шкале барк, а сам параметр может быть приближенно рассчитан по следующей формуле:

$$\psi \approx 1,0674 \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} (0,06583 f_s / 1000) \right)^{1/2} - 0,1916,$$

где f_s — частота дискретизации, Гц. В дальнейшем используется автокорреляционный метод расчета коэффициентов линейного предсказания (16);

4) кепстральные коэффициенты, рассчитанные по коэффициентам линейного предсказания с неравномерным частотным разрешением (СС-WLPC). Для этого также применялась формула (19).

В качестве меры расстояния между векторами признаков типа LPC и WLPC использовалось информационное рассогласование в виде (2). Вместе с тем в качестве меры расстояния при использовании СС-LPC и СС-WLPC была выбрана евклидова метрика.

На подготовительном этапе из сегментов, полученных из обучающего множества слов, были сформированы кластеры с помощью алгоритма k -средних. При этом производилось несколько запусков алгоритма с различными начальными условиями для нахождения оптимального разбиения. Таким образом, для каждого значения числа кластеров Γ от 8 до 1024 было найдено свое разбиение исходного множества по кластерам и их центры, которые будем называть кодовой книгой $W = \{w_1, \dots, w_\Gamma\}$. Следует отметить, что построение кодовой книги для признаков LPC и WLPC выполнялось с помощью модифицированного алгоритма k -средних с использованием алгоритма (11)–(16) для вычисления центров кластеров.

Для иллюстрации свойств получаемой по алгоритму (11)–(16) оптимальной AP-модели на рис. 2, а представлены графики функции $N_r(f)$ для двух реализаций английской фонемы $[uh]$ и полученной на их основе оптимальной AP-модели ЭРЕ. Данная функция может рассматриваться как спектральная плотность мощности (СПМ) нерекурсивного фильтра, коэффициенты которого задаются вектором авторегрессии a .

Здесь тонкими сплошными линиями показаны СПМ выбранных реализаций, а полужирная линия соответствует СПМ, найденной с помощью алгоритма (11)–(16) оптимальной AP-модели. Видно, что полученная результирующая модель учитывает особенности обеих реализаций фонемы $[uh]$. Дополнительно на рис. 2, б показан уве-

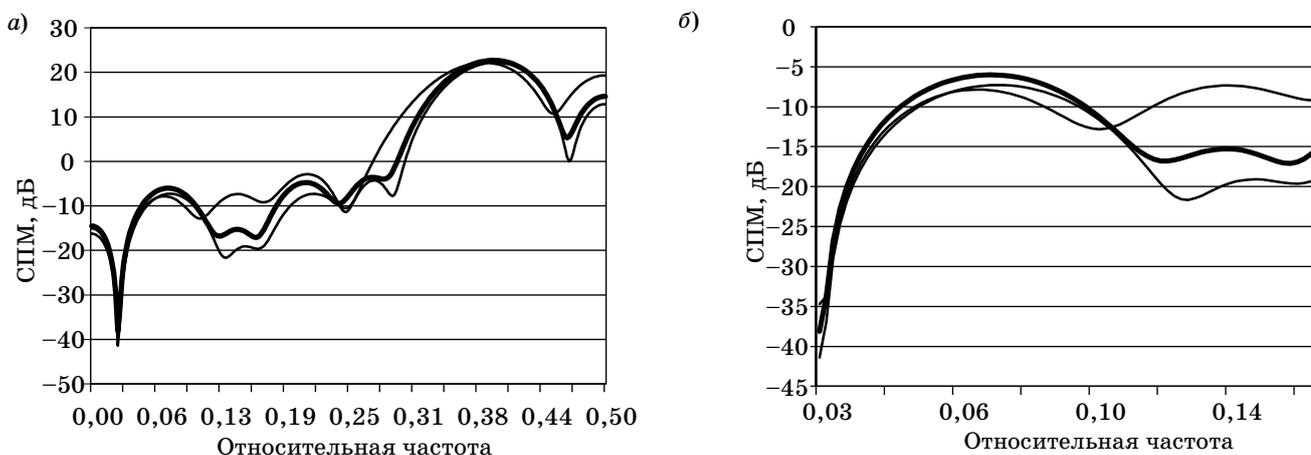


Рис. 2. График (а) и фрагмент (б) СПМ оптимальной AP-модели ЭРЕ

личный фрагмент СПМ всех трех моделей в интервале относительной частоты 0,03...0,12.

Как можно видеть, СПМ оптимальной модели в районе 0,06 проходит над СПМ исходных АР-моделей и не является их простой комбинацией.

Для обеспечения возможности применять полученную кодовую книгу в задаче распознавания речи каждому ее элементу был сопоставлен символ из некоторого алфавита $V = \{v_1, v_2, \dots, v_T\}$. Далее было проведено векторное квантование последовательностей признаков по всем реализациям каждого слова из обучающего множества. При этом для каждого слова было сформировано множество последовательностей наблюдений $O_r = \{O_r^1, O_r^2, \dots, O_r^{L_r}\}$, $r = \overline{1, R}$, элементы которого представляют собой последовательности символов из алфавита V , полученных в результате выполнения векторного квантования.

Полный набор таких последовательностей образует обучающее множество для настройки скрытой марковской модели (СММ) с дискретной плотностью наблюдений [18]. При этом вычисляются оптимальные параметры СММ $\lambda = (A, B, \pi)$ для заданной обучающей выборки.

Оптимальными параметрами СММ называются те, которые максимизируют вероятность $p(O|\lambda)$ по всем возможным последовательностям $O = \{O_1, \dots, O_L\}$ из обучающей выборки. Если обозначить q_t состояние в момент времени t , то $A = \{a_{ij}\} = \{p(q_{t+1} = S_j | q_t = S_i)\}$ — матрица вероятностей переходов, содержащая вероятность перехода из состояния i в состояние j ; $B = \{b_j(k)\} = \{p(v_k | q_t = S_j)\}$ — матрица распределения вероятностей наблюдения символа v_k в состоянии j в момент времени t , а $\pi = \{\pi_i\} = \{p(q_1 = S_i)\}$ — начальное распределение вероятностей состояний.

В приводимом эксперименте использовался набор из лево-правых СММ (или моделей Бакуса) λ_r , $r = \overline{1, R}$ с семью состояниями для каждого из R слов. Выбор указанного числа состояний основывается на ранее проведенных исследованиях (см., например [18, с. 380]), в которых показано, что для систем автоматического распознавания речи с малым словарем хорошие результаты распознавания могут быть получены при числе состояний, находящемся в диапазоне 6 ÷ 8 и одина-

ковым для всех СММ. Тем не менее, в настоящее время разработаны различные методы оптимизации структуры СММ (числа состояний и переходов между ними), которые позволяют во многих случаях снизить вероятность ошибок распознавания. Однако рассмотрение указанных методов находится за рамками данной статьи, а заинтересованный читатель может обратиться к работам [26—29] для получения подробной информации.

Найденная кодовая книга W и модели λ_r на следующем этапе использовались для распознавания слов из тестового множества. Для этого аналогичным образом слова сегментировались, признаки, выделенные из сегментов, квантовались с использованием кодовой книги W и, исходя из получившейся последовательности наблюдений O_v , при помощи алгоритма Витерби [18, 30] для каждой СММ λ_r вычислялись оптимальные последовательности состояний $Q = q_1 \dots q_T$, максимизирующих правдоподобие $L_r = \log p_r(Q|O, \lambda_r)$. Решение о том, какое слово распознано, принималось по критерию максимума правдоподобия:

$$v = \arg \max_r L_r.$$

В результате сравнения решения, принятого при распознавании, с априорными данными о классификации слова получаем зависимость величины ошибки распознавания по тестовому набору слов WER (word error rate) от размера кодовой книги для каждого способа выделения признаков:

$$WER = 1 - \frac{S_{\text{прав}}}{S},$$

где $S_{\text{прав}}$ — число правильно распознанных реализаций слов, а S — общее число реализаций. Результаты проведенного эксперимента приведены в таблице.

Из полученных результатов видно, что практически для всех алгоритмов значение минимальной величины ошибки WER достигается при размере кодовой книги, равном 256. При этом наилучшее значение показал алгоритм, использующий коэффициенты линейного предсказания с неравномерным частотным разрешением и модифицированный алгоритм k -средних для

■ Величина ошибки распознавания

Вид вектора признаков	Размер кодовой книги							
	8	16	32	64	128	256	512	1024
LPC	0,218	0,106	0,074	0,047	0,045	0,040	0,041	0,051
CC-LPC	0,190	0,108	0,078	0,053	0,047	0,041	0,048	0,060
WLPC	0,201	0,115	0,070	0,049	0,040	0,035	0,039	0,048
CC-WLPC	0,191	0,105	0,066	0,048	0,043	0,039	0,038	0,046

вычисления кодовой книги. Минимальное значение ошибки WER для него составило 0,035.

Заключение

В работе предложен подход для кластеризации множества AP-моделей речевых сигналов. Для этого вначале был разработан алгоритм для расчета коэффициентов оптимальной по критерию минимума информационного рассогласования AP-модели ЭРЕ, заданной множеством одноименных реализаций. Показано, что используемая в представленной работе в качестве расстояния между AP-моделями мера относится к классу рассогласований Брэгмана.

Для решения собственно задачи кластеризации рассмотрена возможность модификации известного алгоритма кластеризации k -средних, суть которой заключалась в изменении процедуры вычисления центров кластеров в том случае, если они заданы AP-моделями. Дано обоснование сходимости модифицированного алгоритма.

Рассмотренная иллюстрация работы предложенного алгоритма вычисления центроида множества AP-моделей как минимума среднего информационных рассогласований Кульбака — Лейблера показывает, что результирующая модель не является простой комбинацией исходных.

Для оценки эффективности разработанных алгоритмов были проведены их экспериментальные исследования на примере задачи распознавания ограниченного набора слов английского языка с применением аппарата СММ и различных векторов признаков. В результате было показано, что минимальное значение ошибки распознавания достигается при размере кодовой книги (числе кластеров, используемых для представления речевого сигнала в пространстве признаков), равном 256, для большинства рассмотренных векторов признаков. Также показано, что наилучшие результаты достигаются при использовании в качестве признаков коэффициентов линейного предсказания с неравномерным частотным разрешением и соответствующей кодовой книги, найденной при помощи модифицированного алгоритма кластеризации k -средних. Это позволяет говорить о возможности применения предложенных в данной работе алгоритмов при решении задачи обработки и распознавания речи.

Дальнейшее исследование эффективности применения разработанных алгоритмов для распознавания большого набора слов из слитной речи представляется интересной задачей. Ее решение требует большого объема размеченных данных для обработки, чему будет посвящена следующая работа.

Литература

1. Савченко В. В. Информационная теория восприятия речи // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2007. Вып. 6. С. 3–9.
2. Савченко В. В., Пономарев Д. А. Оптимизация фонетической базы данных по группе дикторов на основе критерия МИР // Информационные технологии. 2009. № 12. С. 7–12.
3. Савченко В. В., Акатьев Д. Ю., Губочкин И. В. Автоматическое распознавание изолированных слов методом обеляющего фильтра // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2007. Вып. 5. С. 11–18.
4. Савченко В. В., Акатьев Д. Ю., Карпов Н. В. Автоматическое распознавание элементарных речевых единиц методом обеляющего фильтра // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2007. Вып. 4. С. 11–19.
5. Савченко В. В. Фонема как элемент информационной теории восприятия речи // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 4. С. 3–11.
6. Banerjee A., Merugu S., Dhillon I. S., and Ghosh J. Clustering with Bregman Divergences // J. Machine Learning Research. 2005. N 6. P. 1705–1749.

7. Nielsen F., Nock R. Sided and Symmetrized Bregman Centroids // IEEE Transactions on Information Theory. June 2009. Vol. 55. N 6. P. 2882–2904.
8. Do M. N., Vetterli M. Wavelet-based texture retrieval using generalized Gaussian density and Kullback-Leibler distance // IEEE Transactions on Image Processing. Feb. 2002. Vol. 11. N 2. P. 146–158.
9. Ding N., Vishwanathan S. V. N., Qi Y. t-divergence Based Approximate Inference / NIPS. 2011. P. 1494–1502.
10. Schwander O., Schutz A. J., Nielsen F., Berthoumiou Y. k-MLE for mixtures of generalized Gaussians // 21st Intern. Conf. on Pattern Recognition (ICPR), 11–15 Nov. 2012. P. 2825–2828.
11. Jiang X., Ning L., Georgiou T. T. Distances and Riemannian metrics for multivariate spectral densities // IEEE Transactions on Automatic Control. 2012. Vol. 57. N 7. P. 1723–1735.
12. Kullback S., Leibler R. A. On information and sufficiency // Annals of Mathematical Statistics. 1951. N 22(1). P. 79–86.
13. Georgiou T. T. Distances and Riemannian Metrics for Spectral Density Functions // IEEE Transactions on Signal Processing. Aug. 2007. Vol. 55. N 8. P. 3995–4003.

14. **Брэгман Л. М.** Релаксационный метод нахождения общей точки выпуклых множеств и его применение для решения задач выпуклого программирования // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1967. Т. 7. № 3. С. 620–631.
15. **Макхоул Дж.** Векторное квантование при кодировании речи // ТИИЭР. 1985. Т. 73. № 11. С. 19–61.
16. **Губочкин И. В.** Алгоритм оценки параметров авторегрессионной модели элементарных речевых единиц // Моделирование и анализ информационных систем. 2013. Т. 20. № 2. С. 23–33.
17. **Марпл С. Л.-мл.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
18. **Rabiner L. R., Juang B.-H.** Fundamentals of speech recognition. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993. – 507 p.
19. **Lloyd S.** Least squares quantization in PCM // IEEE Transactions on Information Theory. 1982. N 28(2). P. 129–137.
20. **MacQueen J.** Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proc. of the Fifth Berkley Symp. on Mathematical Statistics and Probability. 1967. Vol. 1. P. 281–297.
21. **Beigi H.** Fundamentals of Speaker Recognition. – Springer, 2011. – 1003 p.
22. **Linde Y., Buza A., Gray R. M.** An algorithm for vector quantizer design // IEEE Transactions on Communication, Jan. 1980. Vol. COM-28. N 1. P. 84–95.
23. **Bottou L., Bengio Y.** Convergence Properties of the k-Means Algorithm // Advances in Neural Information Processing Systems. Denver: MIT Press, 1995. Vol. 7. P. 585–592.
24. **Маркел Д. Д., Грэй А. Х.** Линейное предсказание речи. – М.: Связь, 1980. – 308 с.
25. **Harma A. et al.** Frequency-warped autoregressive modeling and filtering. – Helsinki University of Technology, 2001. – 149 p.
26. **Vasko Jr R. C., El-Jaroudi A., Boston J. R.** An algorithm to determine hidden Markov model topology // ICASSP-96: Conf. Proc. IEEE. 1996. Vol. 6. P. 3577–3580.
27. **Freitag D., McCallum A.** Information extraction with HMM structures learned by stochastic optimization // Proc. of the National Conf. on Artificial Intelligence. – Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London: AAAI Press; MIT Press, 2000. P. 584–589.
28. **Abou-Moustafa K. T., Cheriet M., Suen C. Y.** On the structure of hidden Markov models // Pattern Recognition Letters. 2004. Vol. 25. N 8. P. 923–931.
29. **Кушнир Д. А.** Алгоритм формирования структуры эталона для пословного дикторонезависимого распознавания команд ограниченного словаря // Штучный интеллект. Київ, 2006. № 3. С. 174–181.
30. **Viterbi A. J.** Error bounds for convolutional codes and asymptotically optimal decoding algorithm // IEEE Transactions on Information Theory. Apr. 1967. Vol. IT-13. P. 260–269.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 004.05

РАЗРАБОТКА И АВТОМАТИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АВТОМАТНЫХ ПРОГРАММ

М. А. Лукин,

программист

А. А. Шальто,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассмотрен комплексный подход к разработке и верификации параллельных автоматных программ, в которых иерархические автоматы могут реализовываться в разных потоках и взаимодействовать друг с другом. Предложен интерактивный подход к верификации параллельных автоматных программ при помощи инструментального средства Spin, который включает в себя автоматическое построение модели на языке Promela, приведение LTL-формулы в формат, определяемый инструментальным средством Spin, и построение контрпримера в терминах автоматов.

Ключевые слова — автоматы, параллельные автоматные программы, верификация, проверка моделей, линейная темпоральная логика, Spin.

Введение

Формальные методы все шире используются для повышения качества программного обеспечения. Эти методы не конкурируют с традиционным тестированием, а дополняют его. В данной работе рассматривается верификация методом проверки моделей (model checking) [1–3] при помощи верификатора Spin [4]. Метод проверки моделей характеризуется высокой степенью автоматизации [1], особенно для автоматных систем, так как сам метод основан на автоматах. По этой теме проводятся исследования в России и за рубежом [5–35]. В настоящей статье, являющейся продолжением работ [17, 24, 29], предлагается комплексный подход к разработке и верификации параллельных автоматных программ. На основе предложенного подхода было разработано инструментальное средство Stater, которое позволяет создавать параллельную систему взаимодействующих иерархических конечных автоматов, импортировать конечные автоматы из инструментального средства Stateflow, которое входит в состав MatLab, верифицировать созданную систему конечных автоматов при помощи верификатора Spin, генерировать программный код по созданной системе конечных автоматов.

Описание подхода

Описание автоматной модели

Предлагаемый подход предназначен для построения параллельных систем взаимодействующих иерархических конечных автоматов [36–38]. При этом каждый такой автомат работает в отдельном потоке. Под иерархическим автоматом понимается система вложенных автоматов.

В данной работе каждый граф переходов задает не конкретный автомат, а тип автоматов (по аналогии с типом данных или классом в объектно-ориентированном программировании). Назовем его *автоматным типом*. У каждого автоматного типа может быть несколько экземпляров (по аналогии с объектом в объектно-ориентированном программировании). Назовем эти объекты *автоматными объектами*. Каждый автоматный объект имеет уникальное имя. В дальнейшем, если не указано иное, автоматные объекты будут называться просто автоматами.

Переходы автоматов осуществляются по событиям. Также на переходе могут быть охранные условия [39]. А что делать, если встретилось событие, по которому нет перехода? Традиционно в теории языков и вычислений детерминированный конечный автомат в таком случае переходит

в недопускающее состояние. Однако такое поведение не всегда удобно. Альтернативой переходу в недопускающее состояние может быть игнорирование таких событий, которое реализуется как неявное добавление пустых (без выходных воздействий) петель по всем событиям, переходы по которым не были добавлены пользователем. Таким образом, в предлагаемом методе при появлении события, по которому нет перехода, автомат может работать в одном из двух режимов:

- это событие игнорируется (добавляются пустые петли по всем событиям);
- автомат переходит в недопускающее состояние.

Вводится специальное событие «*», которое означает переход по любому событию, кроме тех, которые указаны на других переходах из этого состояния (аналог `default` в блоках `switch` для C-подобных языков или `else` в условных конструкциях).

Автомат может иметь конечное число переменных целочисленных типов (включая массивы). Для переменных вводятся следующие модификаторы:

- `volatile` — переменная может применяться в любом месте программы;
- `external` — переменная может использоваться другим автоматом;
- `param` — переменная является параметром автомата.

По умолчанию считается, что переменная не используется нигде, кроме как на диаграмме переходов автомата.

Все события общие для всей системы автоматов.

Выходные воздействия автомата бывают двух типов:

- 1) на переходах и в состояниях может быть выполнен любой код. Однако верификатор и генератор кода перенесут его без изменений, поэтому код должен быть допустимым в целевом языке;
- 2) запуск на переходах и в состояниях функций, определяемых пользователем на целевом языке программирования (после того, как сгенерирован код).

Автомат может иметь вложенные автоматы любого типа, кроме собственного, иначе будет бесконечная рекурсия. Циклическая рекурсия также запрещена.

Автомат может запускать поток с новым автоматом любого типа. Задается тип автомата `<StateMachine>` и имя `<concreteStateMachine>`. Нельзя запускать несколько автоматов с одним именем. Нельзя запускать автоматы своего типа.

Автомат может взаимодействовать с другим автоматом, выступая источником событий для него. События формируются асинхронно.

Автомат может использовать переменные другого автомата, отмеченные специальным модификатором.

Таким образом, в системе могут быть несколько автоматов с одинаковым графом переходов, более того, часть этих автоматов могут быть вложенными, а часть не обладать этим свойством.

Все запреты проверяются при помощи верификации.

Описание процесса верификации

Для того чтобы провести верификацию программы методом проверки моделей, требуется составить модель программы и формализовать требуемые свойства (спецификацию) на языке темпоральной логики [1]. Поскольку в данной работе используется верификатор `Spin`, то языком темпоральной логики является `LTL` [1]. Построение модели описано в пункте «Генерация кода на языке `Promela`». Модель строится для автоматной программы, поэтому построение может быть выполнено автоматически.

Обозначим автоматный тип через `AType`, автоматный объект — через `aObject`. Пусть состояния `AType` называются s_0, s_1 и т. д., в автомат поступают события e_0, e_1 и т. д., а переменные называются x_0, x_1 и т. д., внешние воздействия второго типа — z_0, z_1 и т. д. Пусть автоматный тип `AType` имеет вложенный автомат `nested`. Пусть `AType` запускает автомат `fork`.

Процесс верификации состоит из следующих этапов.

1. Построение модели — генерация кода на языке `Promela` [4]. Для автоматных программ, как отмечено выше, это выполняется автоматически.

2. Преобразование `LTL`-формулы (переход от нотации автоматной программы в нотацию `Spin`).

3. Запуск верификатора `Spin`.

4. Преобразование контрпримера в термины исходной системы автоматов. Это преобразование автоматных программ также выполняется автоматически.

Эти этапы похожи на этапы ручной верификации при помощи `Spin`. Основным отличием является больший уровень автоматизации и большая приближенность модели к реализации, чем при верификации неавтоматных программ. Ниже описана реализация интерактивности, а затем все четыре этапа верификации.

Интерактивность. Одна из главных проблем при верификации методом проверки моделей — это размер модели Крипке. С целью уменьшить модель (отсечь лишние подробности) будем строить ее интерактивно. Для обеспечения интерактивности вводится возможность выбирать, какие уровни абстракции автоматной системы

входят в модель, а какие нет. Кроме того, модель структурируется понятным для человека образом для того, чтобы пользователь мог самостоятельно модифицировать построенную модель. Опишем уровни абстракции по разным аспектам верификации: по переменным, параллелизму, источникам событий и по самому процессу верификации.

Для *переменных* введем следующие уровни абстракции:

- 1) переменные в модели не учитываются;
- 2) переменные в модель включены, но модель абстрагируется от их значения. Недетерминированно выбирается, какое охранное условие будет верно;
- 3) модель вычисляет значения переменных, при этом переменные могут быть следующих видов:
 - а) локальные — могут быть изменены только самим конечным автоматом; все изменения таких переменных находятся только в выходных воздействиях автомата;
 - б) параметры — извне изменяются только один раз при запуске автомата, в остальном они подобны локальным переменным;
 - в) публичные — могут быть изменены в любом месте программы, в которую входит построенная автоматная система. В модели перед каждым переходом автомата таким переменным недетерминированно присваивается произвольное значение;
 - г) совместно используемые — к таким переменным данного автомата имеют доступ другие автоматы, параллельно работающие с этим автоматом.

Параметры и публичные переменные могут быть также одновременно и совместно используемыми.

Вводятся два уровня *параллелизма*: либо он есть, либо его нет. Если параллелизм отсутствует, то в модель не вводятся взаимодействия параллельных автоматов. Остаются только взаимодействия по вложенности.

В качестве *источников событий* для автоматов в системе могут выступать внешняя среда и другие автоматы. Внешняя среда как источник событий для каждого автомата может работать в одном из трех режимов:

- внешняя среда не взаимодействует с автоматом (события от внешней среды не приходят);
- внешняя среда отправляет только те события, которые автомат может в данный момент обработать;
- внешняя среда отправляет любые события.

Другие автоматы как источники событий можно отключить, если отключить параллелизм.

Интерактивность *процесса верификации* основывается на возможностях верификатора Spin и описана в пункте «Запуск верификатора Spin».

Генерация кода на языке Promela. Все состояния каждого автоматного типа перенумеровываются, и для них создаются константы. Для каждого автоматного типа состояния нумеруются отдельно. Имя константы состоит из имени автоматного типа и имени состояния, разделенных знаком подчеркивания. Это сделано для того, чтобы состояния разных автоматов с одинаковыми именами не конфликтовали друг с другом. Пример:

```
#define AType_s0 0
#define AType_s1 1
```

Все события перенумеровываются, и для них создаются константы. Для событий применяется сквозная нумерация. Пример:

```
#define e0 1
#define e1 1
```

Все внешние воздействия второго типа (вызываемые функции) перенумеровываются, и для них создаются константы. Процесс аналогичен тому, как это делается с состояниями.

Так же аналогично все вызовы вложенных и запуски параллельных автоматов перенумеровываются и для них создаются константы.

Каждый тип автоматов записывается в *inline*-функцию, которая моделирует один шаг автомата. Переходы записываются при помощи охраняемых команд Дейкстры [39]. Для каждого типа автоматов создается структура со следующими элементами:

- `byte state` — номер текущего состояния;
- `byte curEvent` — номер последнего пришедшего события;
- `byte ID` — номер автомата;
- `byte functionCall` — номер последней запущенной функции, если такая существует;
- `byte nestedMachine` — номер текущего вложенного автомата, если такой существует;
- все переменные автомата.

Для каждого экземпляра автомата создается экземпляр структуры и канал, по которому происходит передача событий.

Для каждого экземпляра автомата, кроме вложенных, создается процесс, который извлекает из канала событие и запускает встраиваемую (*inline*) функцию автомата с этим событием.

Для каждого экземпляра автомата, кроме вложенных, создается процесс, который недетерминированно выбирает событие и отправляет его в канал автомата.

Для публичных переменных на каждом шаге автомата вызывается специальная функция, которая их недетерминированно изменяет.

Для переменных-параметров такая функция вызывается один раз — при запуске автомата.

Если по данному событию нет перехода и в текущем состоянии есть вложенный автомат, то он

запускается (запускается встраиваемая функция автомата).

Если в текущем состоянии автомат запускает другой автомат, то запускается заранее созданный процесс запускаемого автомата.

Если автомат отправляет событие другому автомату, то он записывает номер отправляемого события в канал этого автомата.

Преобразование LTL-формулы. Расширим нотацию LTL-формулы верификатора Spin. В фигурных скобках будем записывать высказывания в терминах рассматриваемой автоматной модели. Добавим следующие высказывания:

- `aObject.si` — автомат `aObject` перешел в состояние s_i ;
- `aObject.ei` — в автомат `aObject` пришло событие e_i ;
- `aObject.zi` — автомат `aObject` вызвал функцию (внешнее воздействие) z_i ;
- `aObject->nested` — в автомате `aObject` управление передано вложенному автомату `nested`;
- `aObject || fork` — автомат `aObject` запустил автомат `fork`;
- бинарные логические операции с переменными автоматов, например, `aObject.x0 >= fork.x0[fork.x1]`.

Пример LTL-формулы в расширенной нотации:

```
[ ] ((aObject.x0 <= 5) U {aObject.s1}) (1)
```

Алгоритм преобразования формулы в нотацию Spin следующий.

1. Все высказывания в фигурных скобках перенумеровываются.
2. Каждое такое высказывание преобразовывается в терминах модели на языке Promela и записывается в макрос.
3. Макросы подставляются в исходную LTL-формулу.

При использовании этого алгоритма формула (1) преобразуется к виду

```
#define p0 (aObject.x0 <= 5)
#define p1 (aObject.state == AType_s1)
ltl f0 { [ ] (p0 U p1) }
```

Верификатор Spin поддерживает несколько LTL-формул в одной модели, поэтому формулы нумеруются f_0 , f_1 и т. д.

Запуск верификатора Spin. Верификация построенной модели при помощи инструментального средства Spin состоит из следующих этапов.

1. Построение верификатора `rap`. `Rap` — это верификатор для конкретной модели с конкретными темпоральными формулами. По сути, Spin является не верификатором, а генератором верификаторов, каждый из которых работает для конкретного частного случая. При запуске с ключом

`-a` по модели на языке Promela инструментальное средство Spin генерирует верификатор `rap` на языке C.

2. Компиляция верификатора `rap`. При компиляции можно определить константы, которые влияют на то, как в памяти будет храниться модель Крипке [1]. Наиболее компактный вариант задается константой `BITSTATE`, однако в этом случае происходит аппроксимация, и верификация может быть не точна.

3. Запуск верификатора `rap`. Этот верификатор также может быть запущен с разными ключами, важнейшим из которых является `-a` (поиск допускающих циклов).

4. Анализ контрпримера и его преобразование (описано в пункте «Преобразование контрпримера»).

Интерактивность достигается за счет предоставления пользователю возможности использовать вышеперечисленные варианты работы на этапах верификации.

Преобразование контрпримера. Для того чтобы было удобнее понимать контрпример, опишем метод автоматической трансляции контрпримера, который получается на выходе верификатора Spin, в термины используемой автоматной модели.

Для каждого действия автомата создается пометка при помощи функции `printf`. На языке Promela функция `printf` работает аналогично функции `printf` из языка C [40]. Во время случайной симуляции [4] она выводит текст на экран, а во время верификации этот текст появляется в контрпримере. Остается его считать и вывести пользователю. Подробнее преобразование контрпримера описано в работе [29].

1.1. Генерация программного кода

Подход предполагает использование объектно-ориентированных языков, но может быть расширен и для других языков программирования. Однако это выходит за рамки данной работы.

В отличие от таких инструментов как Unimod [41] и Stateflow [42], в данном подходе предлагается генерировать не самостоятельную программу, а подпрограмму. Для объектно-ориентированных языков это набор классов, который пользователь может включить в свою программу. Для того чтобы обеспечить удобство использования сгенерированного кода, делаются следующие шаги (ограниченный объем статьи не позволяет подробно описать алгоритмы первичной и вторичной генерации кода, отметим лишь, что они используют конечные автоматы и были разработаны при помощи самого инструментального средства Stater).

1. Для каждого автоматного типа генерируется отдельный класс в отдельном файле. Такой класс называется автоматизированным классом [38].

2. Сгенерированный класс содержит функцию переходов для автомата; перечисление, содержащее события; необходимые переменные для переходов и определения функций (выходных воздействий второго типа), в которые пользователь может дописать собственный код, и этот код не исчезнет при повторной генерации кода.

3. В коде специальными комментариями помечаются фрагменты программы, которые полностью переписываются и в которые не следует писать пользовательский код. Такой код из остальных мест будет полностью сохранен.

4. Если пользователь добавит новые выходные воздействия второго типа, то их определения будут добавлены к сгенерированному коду.

5. Пользователь может задать пространство имен (или пакет в языке Java), в котором будет находиться сгенерированный код. Если между генерациями кода пространство имен было удалено, то оно будет восстановлено.

6. Если пользователь добавит к автоматизированному классу наследование от базового класса или интерфейса, то повторная генерация кода сохранит это наследование.

7. Генерируются вспомогательные классы, включая менеджер потоков, которые обеспечивают взаимодействие автоматов, находящихся в разных потоках. Если многопоточность не требуется, их генерацию можно отключить.

8. Пользователь может ввести произвольное число автоматных объектов, которые будут запущены при запуске менеджера потоков.

1.2. Хранение графов переходов

При совместной разработке программы несколькими разработчиками существует проблема объединения программного кода, когда один файл редактируется несколькими разработчиками одновременно. Для обычных программ эта проблема решается при помощи систем контроля версий (SVN [43], Git [44], Mercurial [45] и т. д.). Однако системы контроля версий хорошо объединяют только текстовые файлы. Графы переходов конечных автоматов у популярных инструментов плохо приспособлены для совместной разработки. Для того чтобы облегчить объединение графов переходов, в данной работе предлагаются следующие свойства, которыми должен обладать формат хранения таких графов:

- 1) формат должен быть текстовым;
- 2) каждый граф переходов должен быть в отдельном файле или в отдельном множестве файлов;

3) структура графа переходов и информация, которая требуется для отображения, хранятся в разных файлах.

Первое свойство связано с тем, что, как отмечалось выше, современные системы контроля версий умеют объединять версии только текстовых файлов. Типичный пример совместной разработки: два программиста одновременно модифицируют файл. Первый программист отправил файл в репозиторий, а второй программист обновляет файл из репозитория, и получается конфликт версии, хранящейся в репозитории, и рабочей версии. Существующие системы контроля версий во многих случаях автоматически разрешают подобные конфликты, корректно объединяя две версии файла, а когда не могут их разрешить, предоставляют инструменты, которые помогают пользователю (в нашем примере — второй программист) разрешить такие конфликты. Однако это верно только для текстовых файлов. Разрешать конфликты версий в двоичных файлах разработчики должны самостоятельно.

Второе свойство позволяет избежать конфликта версий, когда в автоматной программе модифицируются разные графы переходов. Кроме того, оно позволяет использовать графы переходов повторно.

Третье свойство происходит из того, что изменения графов переходов делятся на два типа — структурные и геометрические. Геометрические изменения затрагивают только внешний вид графов переходов и не влияют на автоматную программу. Таким образом, третье свойство облегчает разрешение конфликтов в структурной части графов переходов.

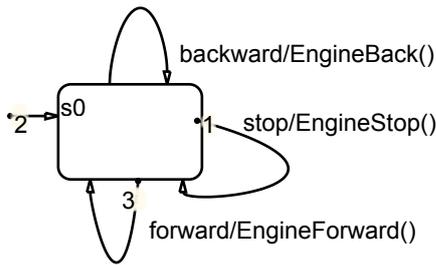
На основе предложенных свойств и был разработан формат хранения этих графов.

Описание инструментального средства Stater

Для поддержки предложенного подхода было разработано инструментальное средство Stater. Оно позволяет:

- создавать параллельную систему конечных иерархических автоматов;
- импортировать конечные автоматы из инструментального средства Stateflow;
- верифицировать созданную систему конечных автоматов при помощи верификатора Spin;
- генерировать программный код по созданной системе конечных автоматов.

Инструментальное средство Stater использовалось при разработке самого себя, а именно модулей загрузки графов переходов из файлов и преобразования LTL-формулы, а также модуля генерации кода.



■ Рис. 1. Граф переходов автоматного типа AEngine

Ни предложенный подход, ни разработанное на его основе инструментальное средство Stater не претендуют на полноту верификации систем, разработанных с помощью Stateflow. Это связано с тем, что спецификация к Stateflow имеет более 1300 страниц [46].

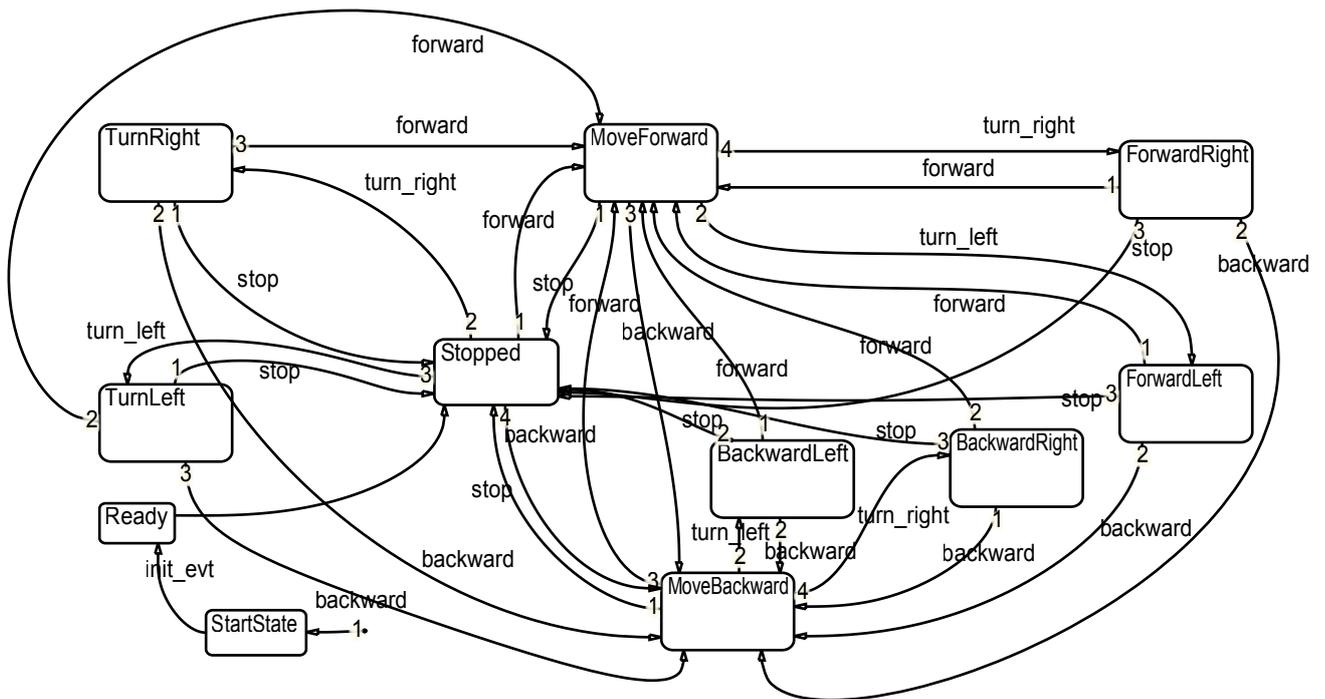
Пример верификации реактивной программы

Продемонстрируем предложенный подход на примере прототипа программы управления гусеничным шасси для робота. В шасси два двигателя — по одному на левую и правую гусеницы. Прототип программы состоит из двух автоматных типов — AEngine и AManager. Два автомата left и right типа AEngine (рис. 1) управляют соответственно левым и правым двигателями.

Автомат типа AManager (рис. 2) отправляет команды на управление двигателями в зависимости от команд для шасси. При входе в состояния он отправляет следующие события автоматам AEngine (слева от стрелки написано имя автомата, справа — событие):

- Stopped: left ← stop, right ← stop;
- MoveForward: left ← forward, right ← forward;
- MoveBackward: left ← backward, right ← backward;
- TurnRight: left ← forward, right ← backward;
- TurnLeft: left ← backward, right ← forward;
- ForwardRight: left ← forward, right ← stop;
- ForwardLeft: left ← stop, right ← forward;
- BackwardRight: left ← backward, right ← stop;
- BackwardLeft: left ← stop, right ← backward.

Проверим свойство «В любой момент если поступила команда "стоп", то будет подана команда остановки левого двигателя». Отметим, что нет возможности проверить, что двигатель остановился, так как это утверждение относится к аппаратной части. Формализуем указанное свойство. Высказывание «Поступила команда "стоп"»



■ Рис. 2. Граф переходов автоматного типа AManager

означает, что в автомат `manager` пришло событие `stop`. В нотации инструментального средства `Stater` оно записывается следующим образом: `{manager.stop}`. Высказывание «Подана команда остановки левого двигателя» означает, что автомат `left` вызвал функцию `EngineStop`. В нотации средства `Stater` оно записывается следующим образом: `{left.EngineStop}`. Поэтому рассматриваемое свойство переписывается следующим образом: в любой момент времени в автомат `manager` пришло событие `stop`, следовательно, в будущем автомат `left` вызовет функцию `EngineStop`:

$G(\{manager.stop\} \Rightarrow (F\{left.EngineStop\})) (2)$

Данное свойство не должно выполняться в следующих состояниях: `StartState`, `Ready` и `Stopped`. В первых двух шахи еще не готово к работе, а в состоянии `Stopped` двигатель и так остановлен. В итоге получаем следующую формулу:

```
[] ( ({manager.stop} && !{manager.
StartState} && !{manager.Ready} &&
!{manager.Stopped}) ->
(<> {left.EngineStop} )) (3)
```

Выполняем верификацию и получаем ответ, который означает, что верифицируемое свойство выполняется в построенной системе:

```
0. [] ( ({manager.stop} && !{manager.
StartState} && !{manager.Ready} && !{manager.
Stopped}) -> (<> {left.EngineStop} ))
Verification successful!
```

Заключение

Таким образом, описан комплексный подход к разработке и верификации параллельной системы иерархических конечных автоматов. На основе этого подхода разработано инструментальное средство `Stater`. Его работа была продемонстрирована на примере прототипа управления гусеничным шасси.

Литература

1. Кларк Э., Грамберг О., Пелед Д. Верификация моделей программ: *Model Checking*. – М.: МЦНМО, 2002. – 416 с.
2. Вельдер С. Э., Лукин М. А., Шалыто А. А., Яминов Б. Р. Верификация автоматных программ. – СПб.: Наука, 2011. – 244 с.
3. Карпов Ю. Г. *Model Checking: верификация параллельных и распределенных программных систем*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
4. Официальный сайт инструментального средства `Spin`. <http://spinroot.com>. (дата обращения: 03.09.2013).
5. Mikk E., Lakhnech Y., Siegel M., Holzmann G. Implementing Statecharts in Promela/SPIN // *Proc. of WIFT'98*. 1998. <http://spinroot.com/gerard/pdf/wift98b.pdf> (дата обращения: 03.09.2013).
6. Latella D., Majzik I., Massink M. Automatic verification of a behavioral subset UML statechart diagrams using the SPIN model-checker // *Formal Aspects of Computing*. 1999. Vol. 11. P. 637–664.
7. Lilius J., Paltor I. P. Formalising UML State Machines for Model Checking // *Proc. of 2nd Int. Conf. UML. Lect. Notes Comp. Sci.* 1999. P. 430–445.
8. Eschbah R. A verification approach for distributed abstract state machines // *PSI*. 2001. Vol. 2. P. 109–115.
9. Shaffer T., Knapp A., Merz S. Model checking UML state machines and collaborations // *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. 2001. Vol. 7. P. 1–13.
10. Tiwari A. Formal semantics and analysis methods for Simulink Stateflow models. Technical report. SRI International, 2002. <http://www.csl.sri.com/users/tiwari/html/stateflow.html> (дата обращения: 09.09.2013).
11. Roux C., Encrenaz E. CTL May Be Ambiguous when Model Checking Moore Machines. UPMC LIP6 ASIM, CHARME, 2003. <http://sed.free.fr/cr/charme2003.ps> (дата обращения: 03.09.2013).
12. Gnesi S., Mazzanti F. On the fly model checking of communicating UML state machines. 2004. <http://fmt.isti.cnr.it/WEBPAPER/onthefly-SERA04.pdf> (дата обращения: 03.09.2013).
13. Gnesi S., Mazzanti F. A model checking verification environment for UML statecharts // *Proc. of XLIII Congresso Annuale AICA*. 2005. <http://fmt.isti.cnr.it/~gnesi/matdid/aica.pdf> (дата обращения: 20.07.2013).
14. Канжелев С. Ю., Шалыто А. А. Автоматическая генерация автоматного кода // *Информационно-управляющие системы*. 2006. № 6. С. 35–42.
15. Виноградов Р. А., Кузьмин Е. В., Соколов В. А. Верификация автоматных программ средствами CPN/Tools // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2006. № 2. С. 4–15.
16. Васильева К. А., Кузьмин Е. В. Верификация автоматных программ с использованием LTL // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2007. № 1. С. 3–14.
17. Лукин М. А. Верификация автоматных программ: бакалаврская работа. СПбГУ ИТМО, 2007. <http://>

- is.ifmo.ru/papers/_lukin_bachelor.pdf (дата обращения: 03.09.2013).
18. Яминов Б. Р. Автоматизация верификации автоматных UniMod-моделей на основе инструментального средства Bogor: бакалаврская работа. СПбГУ ИТМО, 2007. http://is.ifmo.ru/papers/jaminov_bachelor.pdf (дата обращения: 03.09.2013).
 19. Вельдер С. Э., Шалыто А. А. О верификации простых автоматных систем на основе метода Model Checking // Информационно-управляющие системы. 2007. № 3. С. 27–38.
 20. Ma G. Model checking support for CoreASM: model checking distributed abstract state machines using Spin. 2007. <http://summit.sfu.ca/item/8056> (дата обращения: 03.09.2013).
 21. David A., Moller O., Yi W. Formal Verification of UML Statecharts with Real-time Extensions // Formal Methods. 2006. Vol. 3. P. 15–22.
 22. Егоров К. В., Шалыто А. А. Методика верификации автоматных программ // Информационно-управляющие системы. 2008. № 5. С. 15–21.
 23. Курбацкий Е. А. Верификация программ, построенных на основе автоматного подхода с использованием программного средства SMV // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 8. С. 137–144.
 24. Лукин М. А., Шалыто А. А. Верификация автоматных программ с использованием верификатора SPIN // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 8. С. 145–162.
 25. Гуров В. С., Яминов Б. Р. Верификация автоматных программ при помощи верификатора UNIMOD. VERIFIER // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 8. С. 162–176.
 26. Егоров К. В., Шалыто А. А. Разработка верификатора автоматных программ // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 8. С. 177–188.
 27. Гуров В. С., Мазин М. А., Шалыто А. А. Автоматическое завершение ввода условий в диаграммах состояний // Информационно-управляющие системы. 2008. № 1. С. 24–33.
 28. Prashanth C. M., Shet K. C. Efficient Algorithms for Verification of UML Statechart Models // J. of Software. 2009. Vol. 3. P. 175–182.
 29. Лукин М. А. Верификация визуальных автоматных программ с использованием инструментального средства SPIN: магистерская дис. СПбГУ ИТМО, 2009. http://is.ifmo.ru/papers/_lukin_master.pdf (дата обращения: 03.09.2013).
 30. Тимофеев К. И., Астафуров А. А., Шалыто А. А. Наследование автоматных классов с использованием динамических языков программирования (на примере языка RUBY) // Информационно-управляющие системы. 2009. № 4. С. 21–25.
 31. Ремизов А. О., Шалыто А. А. Верификация автоматных программ // Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов: сб. докл. науч.-техн. конф. – М.: ОАО «Концерн Моринформсистема Агат». 2010. С. 90–98. http://is.ifmo.ru/works/_2010_05_25_verific.pdf (дата обращения: 03.09.2013)
 32. Клебанов А. А., Степанов О. Г., Шалыто А. А. Применение шаблонов требований к формальной спецификации и верификации автоматных программ // Семантика, спецификация и верификация программ: теория и приложения: тр. семинара. 2010. С. 124–130. http://is.ifmo.ru/works/_2010-10-01_klebanov.pdf (дата обращения: 03.09.2013).
 33. Вельдер С. Э., Шалыто А. А. Верификация автоматных моделей методом редуцированного графа переходов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2009. № 6. С. 66–77.
 34. Янкин Ю. Ю., Шалыто А. А. Автоматное программирование ПЛИС в задачах управления электроприводом // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 50–56.
 35. Chen C. et al. Formal modeling and validation of Stateflow diagrams // Intern. J. on Software Tools for Technology Transfer. 2012. Vol. 6. P. 653–671.
 36. Шалыто А. А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. – СПб.: Наука, 1998. – 617 с.
 37. Cardei I., Jha R., Cardei M. Hierarchical architecture for real-time adaptive resource management. Secaucus. – NJ, USA: Springer-Verlag, 2000. – 20 p.
 38. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. – СПб.: Питер, 2010. – 176 с.
 39. Dijkstra E. W. Guarded commands, non-determinacy and formal derivation of programs // CACM. 1975. Vol. 8. P. 453–457. <http://www.cs.virginia.edu/~weimer/615/reading/DijkstraGC.pdf> (дата обращения: 03.09.2013).
 40. Последний черновик спецификации языка C. <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg14/www/docs/n1570.pdf> (дата обращения: 03.09.2013).
 41. Официальный сайт проекта UniMod. <http://unimod.sf.net> (дата обращения: 03.09.2013).
 42. Официальный сайт продукта Stateflow. <http://www.mathworks.com/products/stateflow/> (дата обращения: 03.09.2013).
 43. Официальный сайт проекта SVN. <http://subversion.apache.org> (дата обращения: 03.09.2013).
 44. Официальный сайт проекта Git. <http://git-scm.com> (дата обращения: 03.09.2013).
 45. Официальный сайт проекта Mercurial. <http://mercurial.selenic.com> (дата обращения: 03.09.2013).
 46. The MathWorks. Stateflow and Stateflow coder – User's Guide. http://www.mathworks.com/help/releases/R13sp2/pdf_doc/stateflow/sf_ug.pdf (дата обращения: 09.09.2013).

УДК 658.512.22

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ПРИРОДА-ТЕХНОГЕНИКА»

Р. И. Сольницев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

До Суан Чо,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Рассматриваются вопросы разработки программного обеспечения метеорологической поддержки замкнутой системы управления «Природа-техногеника», в том числе SQL server 2012 построения баз данных, структуры, модули программного обеспечения, интерфейсы связей. Предложены основные запросы, используемые в среде MatLab для работы с базами данных.

Ключевые слова — экология, загрязняющие вещества, программирование, метеорологическое обеспечение, базы данных, SQL-запрос.

Введение

В работе [1] были предложены способы, концепция, структура и основные подходы к построению замкнутой системы управления «Природа-техногеника» (ЗСУПТ) на базе современных аппаратно-программных комплексов, позволяющих определить решения, направленные на минимизацию не только воздействия загрязняющих веществ, но и «человеческого фактора».

В работах [2–4] изложены алгоритмы сбора, обработки, передачи метеорологической информации (МИ) в ЗСУПТ и требования к построению соответствующей базы данных (БД). При этом исходная информация поступает из стационарных станций, центров метеорологической информации районов и промзон.

Программные средства метеорологической поддержки

В данной статье рассматриваются программные средства построения БД метеорологической поддержки (МП) реализации указанных в работе [2] алгоритмов.

Средства построения БД с помощью СУБД Microsoft SQL Server 2012, которая выбрана для базы данных МП ЗСУПТ, предложены в работе [5].

Основные причины, определившие такой выбор, следующие:

— SQL Server 2012 — новейшая информационная система управления БД. Помимо стандартных для любой СУБД функций, есть ряд дополнительных средств по системному анализу данных. При этом в БД могут получить доступ любые приложения;

— эта СУБД обладает легкой масштабируемостью, высоким уровнем безопасности, а также обеспечивает наилучшую производительность.

Для работы с SQL Server 2012 требуется соединение с сервером (рис. 1).

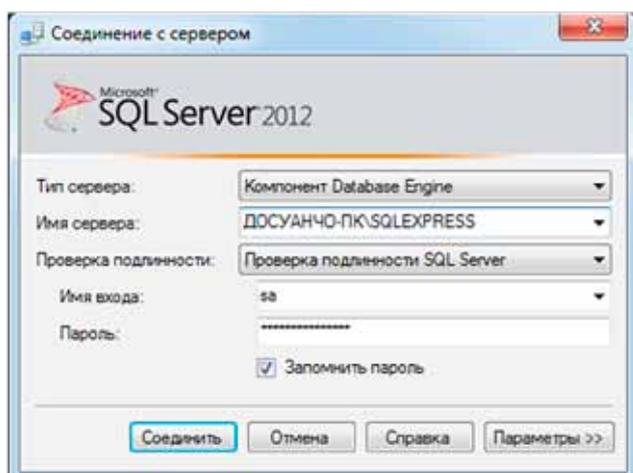
В работе [6] предложены несколько функций SQL.

На основе анализа разнообразных программных средств в качестве среды для разработки программного обеспечения подсистемы САПР МП ЗСУПТ выбрана интегрированная среда MatLab R2011b по следующим причинам:

— применение этой среды в подсистемах САПР ЗСУПТ [7];

— возможность интеграции с другими подсистемами САПР ЗСУПТ, простота подключения к базам данных.

Среда MatLab R2011b через драйверы ADODB поддерживает множество БД. Через драйвер ADODB работает встроенный в MatLab R2011b по-



■ Рис. 1. Соединение с сервером

■ Основные запросы, используемые в среде MatLab

Запрос	Описание
CREATE TABLE	Создает новую базовую таблицу
DROP TABLE	Удаляет базовую таблицу
ALTER TABLE	Изменяет структуру существующей базовой таблицы
CREATE VIEW	Добавляет новое представление
DROP VIEW	Удаляет представление
CREATE INDEX	Создает индекс для столбца
DROP INDEX	Удаляет индекс столбца
ALTER INDEX	Изменяет индекс
INSERT	Добавляет новые строки в таблицы
DELETE	Удаляет строки из таблиц
UPDATE	Обновляет данные, существующие в таблицах
SELECT	Считывает данные из таблиц
CREATE DATABASE	Физически создает
CONNECT	Подключает к существующей БД

строитель запросов к БД. С его помощью можно построить достаточно сложные запросы (таблица), создать отчет или просто просмотреть БД.

Обработка метеорологических данных проводилась в среде MatLab R2011b с помощью приложений *m*-файлов и *s*-функций. Эти функции позволяют их записать и сохранить в файле для использования в качестве встроенных функций MatLab R2011b. Вызов функций производится из *m*-файлов.

Для подключения к SQL Server 2012 рассматривается код в среде MatLab R2011b, написанный в *m*-файле:

```
conn = actxserver('ADODB.Connection');
conn.Open('Provider=sqloledb;Data Source=ДОСУАНЧО-ПК\SQLEXPRESS;Initial Catalog=TEST;User Id=sa;Password=*****');
```

Исходная МИ сохраняется на любом типе файла (excel, docx, ...) и поступает как «вставка» в БД.

Для решения задачи «вставки» данных в БД в среде MatLab используется указанное приложение *m*-файл и *s*-функция. Записанные коды имеют вид:

— в *s*-функции

```
function y = insertDB(year,month,day,hour,value,table)
VALUES(%d,%d,%d,%d,%d,%d),table,day,month,year,hour,value);
stringsql = sprintf('INSERT INTO %s VALUES(%d,%d,%d,%d,%d,%d),table,
year,month,day,hour,value);
disp(stringsql);
conn.Execute(stringsql);
conn.Close();
y = true;
end
```

— в *m*-файле

```
filename = 'C:\Users\ДоСуанЧо\Desktop\DB\T.Quang-U07.xls';
sheet = 1;
xlRange = 'A5:M35';
data = xlsread(filename,sheet,xlRange);
num_rows = size(data,1);
num_cols = size(data,2);
for i = 1:1:num_cols;
for j = 1:1:num_rows;
insertDB(2013,i,j,x,data(j,i),'P')
end
end
```

Структура программного обеспечения подсистемы САПР МП ЗСУПТ в среде MatLab представлена на рис. 2.

База данных МП ЗСУПТ включает следующие файлы: исходной МИ; результатов обработки; программной реализации алгоритмов автоподстройки. В каждом файле формируются таблицы в соответствии с задачами МП ЗСУПТ.

Таблица «tblHour» сохраняет исходные данные по переменным V , T^0 , P , W по часам. Для размещения переменных V , T^0 , P , W по дням или по другому отсчету времени служат другие таблицы «tblDay», «tblMonth», «tblYear» (рис. 3, а).

Файлы результатов обработки МИ:

— таблицы математических ожиданий: «tblspeed_midday», «tblspeed_midnight», «tblspeed_day», «tblspeed_month», «tblspeed_year» (рис. 3, б);



■ Рис. 2. Структура программного обеспечения подсистемы САИР МП ЗСУПТ

— таблицы автокорреляционных функций: «tblcorrelation_midday», «tblcorrelation_midnight», «tblcorrelation_day», «tblcorrelation_month», «tblcorrelation_yeas» (рис. 3, в).

Аналогично формируются таблицы взаимнокорреляционных функций, условных математических ожиданий и других характеристик скорости потока переноса загрязняющих веществ.

Файлы программной реализации алгоритмов автоподстройки ПИД-регулятора с усреднением по времени (полдень–полночь, месяцы, годы) размещаются в отдельных таблицах законов управления автоподстройкой ПИД-регулятора с усреднением по суткам, по месяцам.

Информация из БД МП ЗСУПТ отображается на экране оператора в виде рисунков, графиков, таблиц.

После запуска программного обеспечения подсистемы САИР МП ЗСУПТ происходит включение программных модулей, входящих в соответствующие блоки МП ЗСУПТ.

Блок «База данных»:

— модуль «Вставка» для заполнения таблиц в БД МИ из любых типов файлов после получения исходных метеорологических данных;

— модуль «Формирование» для формирования МИ в *i*-й таблице или нескольких таблицах;

формирование МИ в таблице будет выглядеть следующим образом:

```
SELECT y.year,m.month,d.day,h.hour,h.T_value,h.W_value,h.V_value
FROM tblYEAR y
JOIN tblMonth m
ON y.IDmonth=m.IDmonth
JOIN tblDay d
ON m.IDday=d.IDday
JOIN tblHour h
ON d.IDhour=h.IDhour
```

— модуль «Создание» для создания новых таблиц или столбцов;

— модуль «Удаление» для удаления строки из таблиц;

— модуль «Обновление» для обновления МИ в таблице.

Блок «Обработка»:

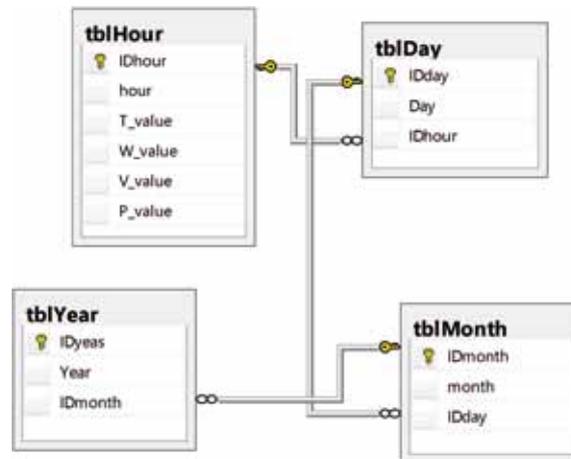
— модуль «Вычисление» для расчетов:

• математических ожиданий, автокорреляционных функций, взаимных корреляционных функций;

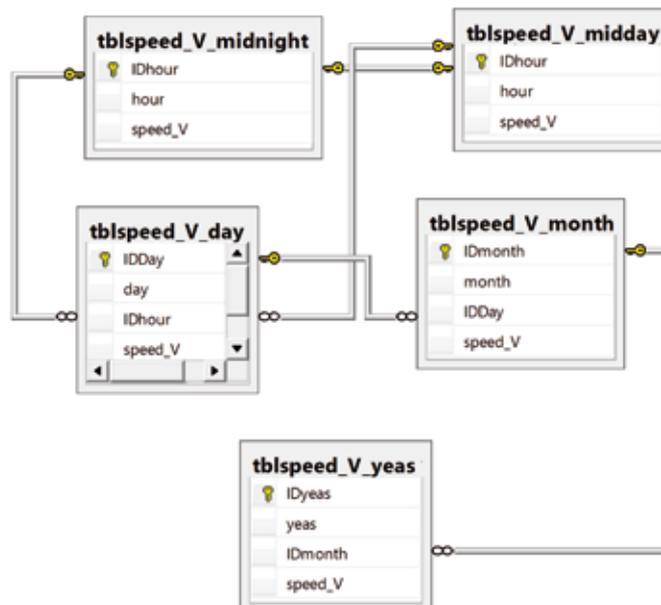
• скорости потока переноса загрязняющих веществ;

— модуль «Прорисовка» — прорисовка графиков, рисунков.

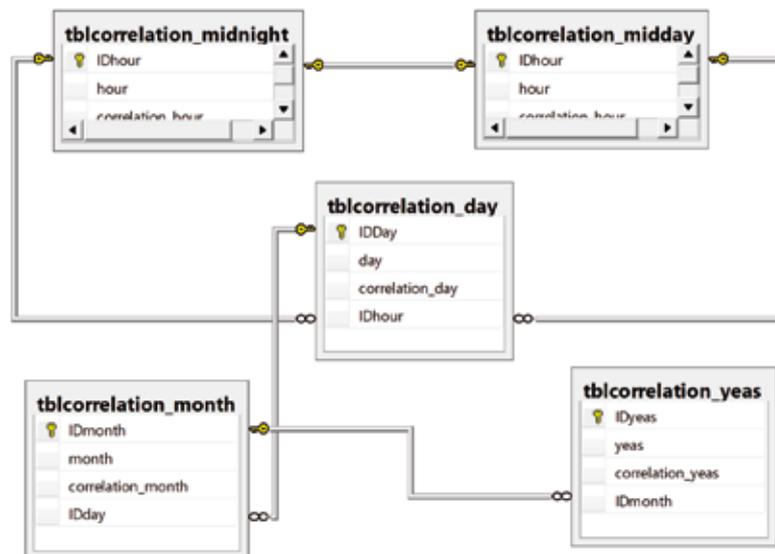
а)



б)



в)



■ Рис. 3. Структура таблиц БД МП ЗСУИТ

В блоке «Программатор» формируются законы управления автоподстройкой ПИД-регулятора в ЗСУПТ как временные процессы [2]. Здесь же осуществляется ввод закона управления автоподстройкой в контроллер ПИД-регулятора.

Результаты, полученные на этапах «Обработка» и «Программатор», сохраняются в базе данных МП ЗСУПТ.

Для работы программного обеспечения подсистемы САПР МП ЗСУПТ потребуется запуск среды MatLab R2011b, SQL Server 2012.

Системные требования к программному обеспечению для установки SQL Server 2012 и MatLab R2011b следующие.

1. Установка MatLab:

- любой процессор Intel® или AMD архитектуры x86 с поддержкой набора инструкций SSE2;
- 1024 МБ оперативной памяти (рекомендуется 2048 МБ);
- 3–4 ГБ места на жестком диске для стандартной установки (1 ГБ — для MatLab без дополнений);
- поддерживаемые операционные системы (семейства Windows): Windows XP Service Pack 3, Windows Server 2003 R2 Service Pack 2, Windows

Vista™ Service Pack 2, Windows Server 2008 Service Pack 2, Windows 7.

2. Установка SQL Server:

- Windows XP Service Pack 3, Windows Server 2003 R2 Service Pack 2, Windows Vista™ Service Pack 2, Windows Server 2008 Service Pack 2, Windows 7, Windows 8;
- минимум 4,2 ГБ свободного места на диске;
- процессор, совместимый с Intel, с частотой 1 ГГц;
- ОЗУ: минимум 512 МБ для SQL Server Express с инструментами и SQL Server, экспресс-выпуск с дополнительными службами, а также 4 ГБ для служб Reporting Services, которые устанавливаются вместе с SQL Server Express с дополнительными службами.

Заключение

Предложенные в статье средства построения базы данных для МП ЗСУПТ, а также программное обеспечение позволяют осуществлять процессы минимизации загрязняющих веществ в режиме реального времени с учетом влияния метеорологической обстановки.

Литература

1. Сольников Р. И., Коршунов Г. И. Системы управления «Природа — Техногеника». — СПб.: Политехника, 2013. — 205 с.
2. Сольников Р. И., До Суан Чо. Алгоритмизация обработки и передачи метеорологических данных в замкнутой системе управления «Природа-техногеника» // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С. 30–35.
3. До Суан Чо. Вопросы информационного обеспечения замкнутой системы управления «Природа — Техногеника»: материалы XV Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2012). СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. С. 134–137.
4. Сольников Р. И., До Суан Чо. Построение баз данных метеорологической информации в замкнутой системе управления «Природа-техногеника» // Программные продукты и системы. 2013. № 1. С. 125–129.
5. Карвил Б. Программирование баз данных SQL, типичные ошибки и их устранение. — М.: Рид групп, 2012. — 336 с.
6. Маркин А. В. Построение запросов и программирование на SQL: учеб. пособие / РГРТУ. — Рязань, 2008. — 312 с.
7. Сольников Р. И., Тревогода М. А. Программное обеспечение подсистемы САПР замкнутой системы управления «Природа-техногеника» // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4. С. 34–38.

УДК 004.453

ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УСТАНОВКИ И ЗАПУСКА GNU/LINUX-ОКРУЖЕНИЯ НА УСТРОЙСТВАХ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ANDROID

А. А. Скшидлевский,

канд. техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Проводится обзор основных функций разработанного программного обеспечения для автоматизации установки GNU/Linux-дистрибутивов и запуска Linux-приложений на устройствах под управлением Android. Даны примеры его возможного использования, сравнение с аналогами. Описываются принципы работы программного обеспечения. Приведены оценка производительности и статистика по апробации.

Ключевые слова — мобильные устройства, операционные системы, программное обеспечение, Android, Linux.

Введение

За последние годы платформа Android получила немалое распространение: это мобильные телефоны, планшеты, электронные книги, медиаплееры, игровые приставки, телевизоры, встраиваемые системы. Платформа Android имеет открытый исходный код и построена на ядре Linux, однако не поддерживает запуск приложений других операционных систем. Тем не менее, в ядре Linux заложены механизмы, позволяющие при определенных условиях запускать GNU/Linux-приложения на устройствах под управлением Android [1]. Идея запуска Linux-приложений появилась из-за желания иметь привычный инструментарий для системного администрирования прямо на мобильном устройстве, а существующие аналоги не удовлетворяли всем требованиям. Так появилось приложение Linux Deploy — для простой установки и запуска GNU/Linux-окружения на устройствах под управлением Android. Можно выделить основные задачи, которые были поставлены перед разработкой приложения:

— разработать простой, но эффективный интерфейс для установки, настройки и дальнейшего использования GNU/Linux-окружения;

— обеспечить параллельную работу Linux- и Android-приложений;

— реализовать весь доступный функционал Linux-приложений мобильных устройств (как консольных, так и графических);

— обеспечить поддержку наиболее распространенных Linux-дистрибутивов;

— реализовать различные варианты установки окружения и обеспечить поддержку как старых, так и новых ARM-процессоров.

Представленное приложение достаточно специфично, однако можно выделить основные направления его возможного применения: запуск специализированных приложений на встраиваемых системах, использование в проектах «Сделай сам», доступ к инструментарию GNU/Linux с мобильных устройств для технических специалистов, обучение или развлечение (например, была запущена игра «Герои 3»).

В настоящее время наличествуют схожие приложения зарубежных разработчиков, но все они имеют ряд ограничений, достаточно сложны в применении, имеют закрытый исходный код, распространяются платно и не поддерживают русский язык. В табл. 1 приведено сравнение с аналогами по основным характеристикам.

Приложение Complete Linux Installer активно развивается, однако все еще не соответствует некоторым необходимым критериям. Принципиальное отличие этого приложения заключается в том, что образ каждого дистрибутива подготавливается вручную и не всегда своевременно об-

■ Таблица 1. Сравнение с аналогами

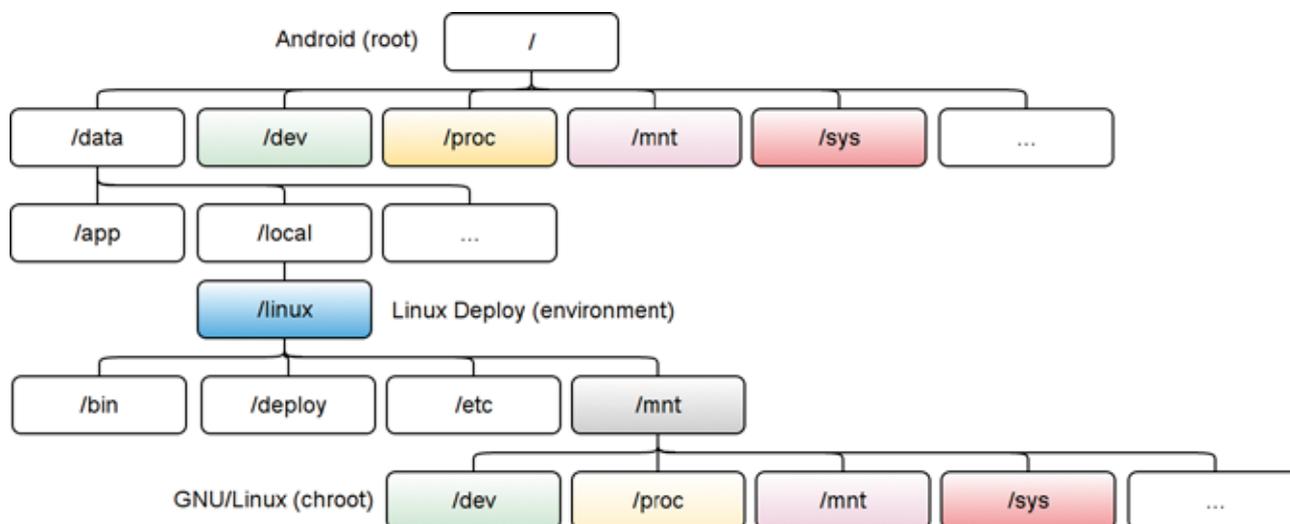
Характеристика	Linux Deploy	Linux Installer	Complete Linux Installer
Поддерживаемые дистрибутивы Linux	Debian, Ubuntu, Arch Linux, Fedora, openSUSE, Kali Linux, Gentoo (через rootfs: Backtrack, Bodhi Linux, Angstrom и др.)	Debian, Ubuntu	Debian, Ubuntu, BackTrack (бета-версия: Kali Linux, Arch Linux, Fedora, openSUSE)
Установка по сети из официального репозитория	Да	Да	Нет
Поддержка ARMv7	Да	Нет	Нет
Тип установки	Файл, раздел, директория	Файл	Файл
Интерфейс управления	Консоль, SSH, VNC, X Window System	Консоль, SSH, VNC	Консоль, SSH, VNC
Поддерживаемые языки	Русский, английский	Английский	Английский
Тип лицензии	Открытая, GPLv3	Коммерческая	Коммерческая

новляется. В то же время Linux Deploy позволяет устанавливать дистрибутив через Интернет из официального репозитория, что дает возможность всегда получать последние версии программного обеспечения.

Принцип работы

Принцип работы приложения заключается в использовании механизма ядра Linux, называемого chroot. Данный механизм позволяет запускать приложения в изолированном пространстве, корнем которого на уровне файловой системы будет являться выбранный каталог. В корне файловой системы Android располагаются файлы самой платформы и каталоги, в которые ядро Linux проецирует свои компоненты: каталоги /dev, /proc, /sys и каталог монтирования карт па-

мяти /mnt. Приложение создает собственный каталог /data/local/linux, в котором размещает основные команды, сценарии установки Linux и файлы конфигурации (каталоги /bin, /deploy, /etc). На рис. 1 показана файловая структура, создаваемая приложением в операционной системе Android. Далее в каталоге /mnt создается образ новой GNU/Linux-системы, устанавливаются необходимые пакеты, а также монтируются системные корневые каталоги /dev, /proc, /sys и /mnt. После этого осуществляется вызов команды chroot, с помощью которой запускаются необходимые Linux-приложения внутри подготовленного окружения. Доступ к управлению такими приложениями можно получить из локальной консоли Android либо по сети с использованием протоколов SSH и VNC. Также поддерживается возможность запуска сторонних приложений че-



■ Рис. 1. Файловая структура Linux Deploy в операционной системе Android

рез сетевой протокол X Window System либо через X-сервер, который выводит изображение напрямую через фрейм-буфер устройства, что позволяет отображать графику без промежуточных слоев типа VNC.

Для поддержки каждого дистрибутива разработаны специальные инсталлятор и конфигуратор. В своей работе они используют утилиту BusyBox [2]. Инсталлятор занимается загрузкой, распаковкой и установкой пакетов из официального репозитория выбранного дистрибутива. Конфигуратор позволяет автоматически выполнить все необходимые настройки выбранного дистрибутива перед его запуском. Для каждой установки GNU/Linux-дистрибутива создается отдельный профиль, благодаря чему можно в последующем переключаться между установленными дистрибутивами.

Основные функции и возможности приложения

Можно выделить основные функции приложения:

- автоматическая установка GNU/Linux-окружения выбранного дистрибутива одной кнопкой (на данный момент поддерживается 7 дистрибутивов);

- автоматическая настройка окружения и перенастройка сторонних образов GNU/Linux (можно использовать образы дистрибутивов, которых нет в списке поддерживаемых, а также использовать rootfs-архивы);

- запуск Linux-приложений внутри выбранного окружения;

- предоставление доступа к приложениям и графической среде GNU/Linux;

- остановка и полное удаление приложения и GNU/Linux-системы с Android-устройства (не производит необратимых изменений на устройстве).

Также следует отметить основные возможности приложения:

- одновременная работа Android и Linux-приложений;

- Linux-приложения работают с максимальной возможной скоростью, поскольку приложение не является эмулятором;

- доступ к ресурсам Android из Linux-приложений;

- поддержка дистрибутивов Debian, Ubuntu, Arch Linux, Fedora, openSUSE, Kali Linux, Gentoo;

- поддержка сборки GNU/Linux с оптимизацией под разные версии ARM процессоров, включая ARMv7;

- поддержка окружений рабочего стола LXDE, Xfce, GNOME, KDE;

- поддержка установки в файл (образ), на раздел карты памяти, в директорию;

- поддержка файловых систем ext2, ext3, ext4;

- поддержка управления через локальную консоль, SSH, VNC, X Window System (включая фрейм-буфер);

- профилирование — хранение и управление настройками нескольких дистрибутивов;

- поддержка русского и английского языков интерфейса и локализации дистрибутивов.

Интерфейс приложения Linux Deploy показан на рис. 2. Рассмотрим настройки приложения [3].

Профили. Параметры каждой установки хранятся в отдельном именованном профиле. Количество профилей не ограничено. Можно свободно переключаться между профилями, работая поочередно с различными дистрибутивами. Профили можно экспортировать и импортировать в виде xml-файлов.

Параметры установки дистрибутива. Каждый профиль содержит в себе настройки одного дистрибутива. Сюда входит название дистрибутива, версия и архитектура (версии ARM). Если посчитать все поддерживаемые дистрибутивы, их версии и архитектуры, то на данный момент Linux Deploy поддерживает 38 различных вариантов установки GNU/Linux. Далее указывается адрес репозитория в Интернете, откуда будет выполняться установка.

Необходимо предварительно выбрать тип установки из поддерживаемых в настоящее время трех вариантов: файл, раздел и директория. При установке в файл задается размер файла образа и желаемая файловая система, которая будет создана внутри образа. В этом режиме создается файл образа и монтируется в системе, куда в

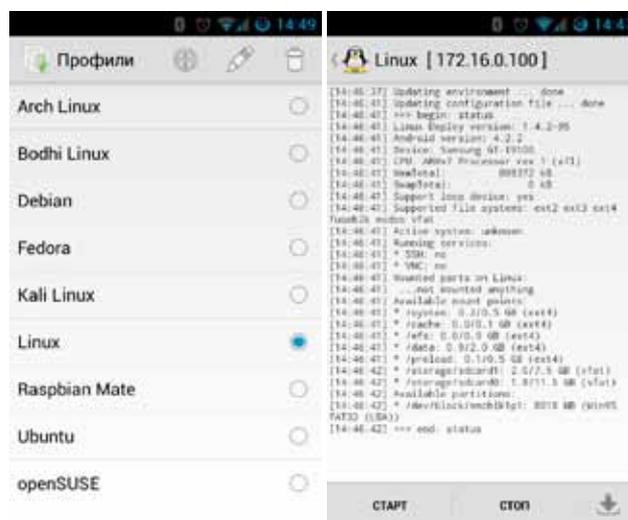


Рис. 2. Интерфейс приложения Linux Deploy

последующем выполняется установка дистрибутива. При установке на раздел вместо пути к файлу указывается блочное устройство — раздел карты памяти. На указанном разделе будет создана файловая система, раздел смонтируется и на него выполнится установка. Директория в качестве типа установки может быть выбрана только в том случае, если она находится на разделе с файловой системой ext2, ext3 или ext4, который смонтирован без опций noexec или nodev.

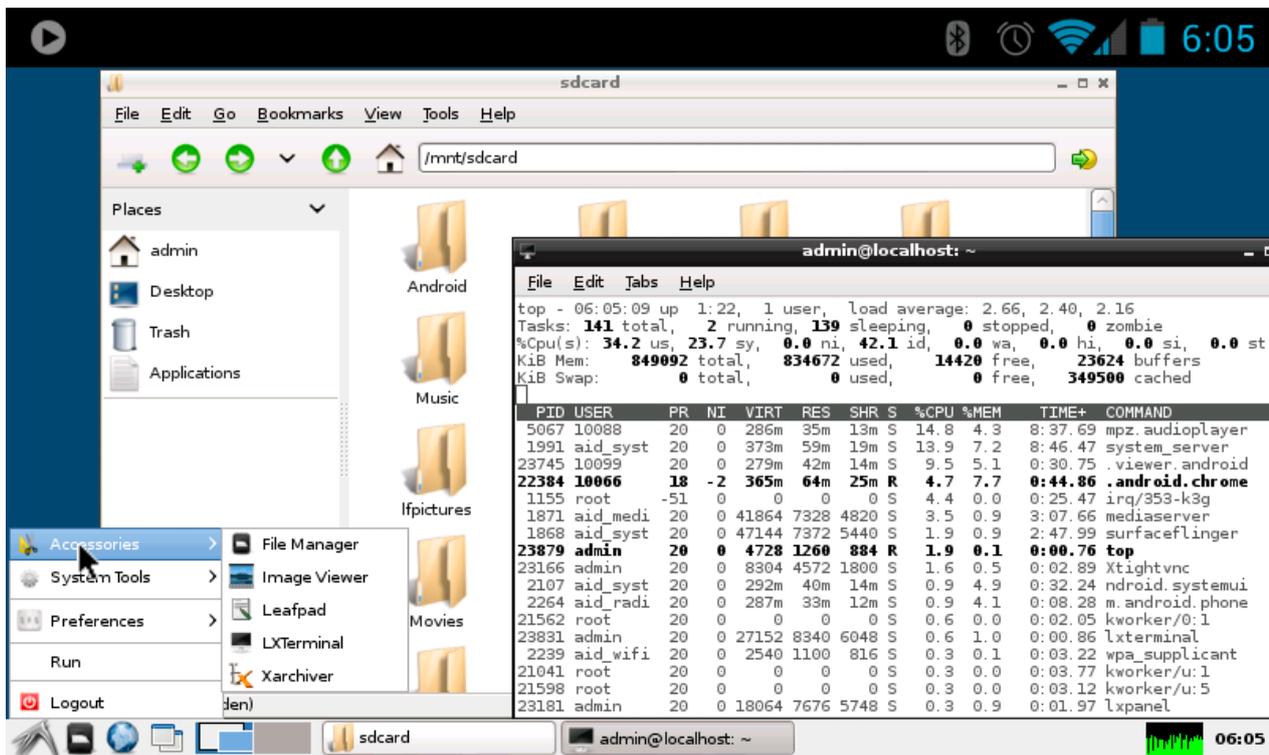
Перед установкой также необходимо указать имя нового пользователя в системе, адрес DNS-сервера, язык локализации и окружение рабочего стола. Пароль для пользователя по умолчанию задается «changeme». На данный момент поддерживаются следующие окружения рабочего стола: XTerm, LXDE, Xfce, GNOME и KDE. Установка может включать одно из перечисленных окружений либо вообще не включать графические компоненты, если это не требуется. Во время установки распаковываются все необходимые пакеты для выбранного окружения и выполняется настройка его запуска. Есть возможность настроить ручную запуск любой другой среды помимо указанных, если это необходимо. На рис. 3 представлен снимок экрана с устройства Android, на котором отображается окружение рабочего стола LXDE, работа с рабочим столом осуществляется через VNC-клиент.

Стоит отметить, что большая часть всех параметров может быть оставлена без изменения, что позволяет приложению автоматически выбрать наиболее подходящие.

Кроме полной установки можно выполнить переконфигурирование существующего дистрибутива, тем самым адаптировать любой сторонний образ для работы через программу Linux Deploy.

Параметры запуска. Под запуском дистрибутива понимается запуск некоторых приложений и служб внутри chroot-окружения. Запуск и остановка сервисов осуществляются одной кнопкой. Поддерживается запуск SSH-сервера, VNC-сервера, X Windows System в режиме клиента либо сервера через фрейм-буфер. Для каждого запускаемого сервиса предусмотрены свои настройки. Также можно осуществлять запуск любых других пользовательских скриптов.

Особый интерес представляет возможность запуска графической среды через внешний X-сервер. В этом случае запуск осуществляется по сети. X-сервер должен быть запущен на компьютере, а изображение с устройства передается на X-сервер. Подобно технологии тонких клиентов, на стороне X-сервера (клиенте) строится изображение, а само приложение выполняется на устройстве (сервере). В отличие от VNC, где изображение передается в виде потока сжатых кар-



■ Рис. 3. Пример запуска дистрибутива Debian и доступа к нему по VNC из Android

■ **Таблица 2.** Скорость чтения/записи внутри chroot-окружения

Файловая система	Скорость чтения, МБ/с	Скорость записи, МБ/с
vfat	14,1	12,0
ext2	14,9	3,9
ext4	14,9	16,6
ext2 (loop)	17,0	7,4
ext4 (loop)	17,2	8,8

■ **Таблица 3.** Время установки и занимаемый объем дистрибутива

Графическая среда	Время установки, мин	Занимаемый объем, МБ
Без графики	12	260
XTerm	14	290
LXDE	19	450
Xfce	20	495
GNOME	55	1300
KDE	80	1300

тинок, здесь передаются отдельные компоненты графического интерфейса, сборка которых осуществляется на стороне X-сервера.

Другой интересной возможностью запуска графической среды на устройстве является запуск X-сервера в режиме фрейм-буфера. Данный режим дает указание X-серверу перенаправлять изображение напрямую на видеоустройство, а также использовать прямой доступ к устройствам ввода. В этом случае появляется выигрыш в производительности за счет прямого доступа к аппаратным ресурсам устройства. Однако тут есть обратная сторона. К сожалению, графическая подсистема Android и GNU/Linux не могут работать одновременно. Чтобы иметь возможность запустить графические приложения GNU/Linux в этом режиме, Linux Deploy приостанавливает работу Android на время, пока выполняются Linux-приложения. После завершения графического сеанса работа Android корректно возобновляется без необходимости перезагружать устройство. Другим ограничением использования данного режима является проблема совместимости Xorg с аппаратными ресурсами устройства в некоторых случаях.

Консольный интерфейс. Установку и запуск GNU/Linux-дистрибутивов с использованием Linux Deploy можно произвести не только через графический интерфейс, но и из консоли Android, локально или удаленно. Для этого есть специальная команда «linuxdeploy», с помощью которой осуществляется полное управление дистрибутивом.

Производительность. Было проведено исследование производительности GNU/Linux-системы

внутри chroot-окружения. В табл. 2 указана скорость чтения/записи внутри chroot-окружения, а в табл. 3 — время установки и занимаемый объем дистрибутива при установке через Linux Deploy. Результаты приведены для Debian 7.0 wheezy/armhf на Samsung Galaxy S II (i9100).

Заключение

Разработанный инструмент — приложение Linux Deploy — могут использовать в своей работе системные администраторы, программисты и обычные пользователи, которые хотят расширить функционал платформы Android за счет возможности запуска великого многообразия программного обеспечения GNU/Linux.

Исходные коды приложения опубликованы на github.com (<https://github.com/meefik/linuxdeploy>), форум с поддержкой от заинтересованных пользователей открыт на сайте 4pda.ru (<http://4pda.ru/forum/index.php?showtopic=378043>), а само приложение можно установить из Google Play. На данный момент можно привести следующую статистику:

- более 50 000 установок в Google Play (10 000 активных пользователей);
- 91 % положительных отзывов (450 отзывов, средняя оценка 4,6);
- работоспособность подтверждена на более чем 100 устройствах;
- более 25 000 просмотров демонстрационного ролика (830 ч суммарного просмотра);
- заинтересованность проектом и публикация материалов на популярных интернет-порталах (habrahabr.ru, 4pda.ru, linux.org.ru, opennet.ru, xda-developers.com и другие) пользователями приложения.

Литература

1. Рубанов В. В. Современная инфраструктура для обеспечения совместимости linux-платформ и приложений // Тр. Института системного программирования РАН. М., 2009. С. 129–141.
2. Бражук А. Утилита BusyBox: универсальный инструмент управления встраиваемыми Linux-системами // Компоненты и технологии. 2012. № 5(130). С. 160–162.
3. Калиниченко Ю. В., Калиниченко В. А. Проектирование приложений для Android // Сб. науч. тр. Sworld по материалам междунар. науч.-практ. конф. Одесса: Куприенко Сергей Васильевич, 2012. Т. 3. № 1. С. 17–19.

УДК 621.39

К ВОПРОСУ ЕДИНСТВА ТЕРМИНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ

В. В. Волхонский,

канд. техн. наук, доцент

С. Л. Малышкин,

аспирант

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Анализируются термины и определения физической защиты, используемые в различных предметно-ориентированных областях информационной, ядерной, антикриминальной и антитеррористической безопасности, в государственных стандартах и литературных источниках. Показаны существенные отличия в используемых определениях. Предлагаются единые обоснованные определения физической защиты и системы физической защиты, согласующиеся с нормативными документами и стандартами и позволяющие устранить разночтения в терминологии в области методов и средств обеспечения физической безопасности объектов.

Ключевые слова — физическая защита, физическая безопасность, терминология, определения.

Введение

В настоящее время сложилась ситуация, когда специалисты в области обеспечения безопасности иногда говорят на «разных языках», используя различные формулировки для обозначения одного и того же понятия и одинаковые термины для обозначения разных задач и систем. Вызвано это тем, что ряд существующих терминов являются в значительной степени проблемно-ориентированными. Это относится, в частности, к таким понятиям как «физическая защита» (ФЗ) и «система физической защиты» (СФЗ). Такое отсутствие единства терминологии в некоторых случаях приводит к проблемам как в области практики создания СФЗ, так и при решении вопросов теории синтеза и анализа средств и систем обеспечения безопасности.

С этой точки зрения нужно говорить о целесообразности и актуальности формулировки общих терминов, справедливых для любых объектов обеспечения безопасности. Поэтому в данной работе авторы ставят следующие основные задачи:

— анализ известных терминов «физическая защита» и «система физической защиты», используемых в областях информационной и ядерной безопасности и в других предметно-ориентированных областях;

— на основе этого анализа — формулировка единых терминов, с одной стороны, инвариантных к конкретным проблемно-ориентированным областям и, с другой стороны, применимых для других предметно-ориентированных задач обеспечения безопасности, терминов, согласующихся с уже имеющимися определениями государственных стандартов.

Анализ ситуации в области терминологии

Вопросы терминологии в различных областях методов и средств обеспечения безопасности (МСОБ), например, информационной или ядерной, разрабатывались, как правило, в соответствии с историческими потребностями и востребованностью тех или иных МСОБ. На начальном этапе упомянутые понятия ФЗ и СФЗ формулировались в разных предметно-ориентированных областях с учетом специфики каждой конкретной области, что неизбежно ограничивало общность понятия. Конечно, предметно-ориентированные определения также нужны, однако они, как минимум, должны быть согласованы с общими определениями.

Более того, само понятие «физическая защита» трактуется в разных документах и особенно разными авторами принципиально различным образом. Существует, например, мнение, что ин-

формационная безопасность не включает ФЗ, при том, что в государственных стандартах определено понятие ФЗ информации [1—3].

Этот вопрос важен и с точки зрения международного общения специалистов, требующего перевода рассматриваемых понятий с русского на английский и наоборот. Примером попытки решить такую задачу может служить работа [4].

На современном этапе развития систем безопасности и, как их частных случаев, СФЗ в условиях увеличения количества угроз и способов их реализации, роста разнообразия объектов обеспечения безопасности (ООБ), различных МСОБ возникает необходимость обобщения и уточнения существующих понятий.

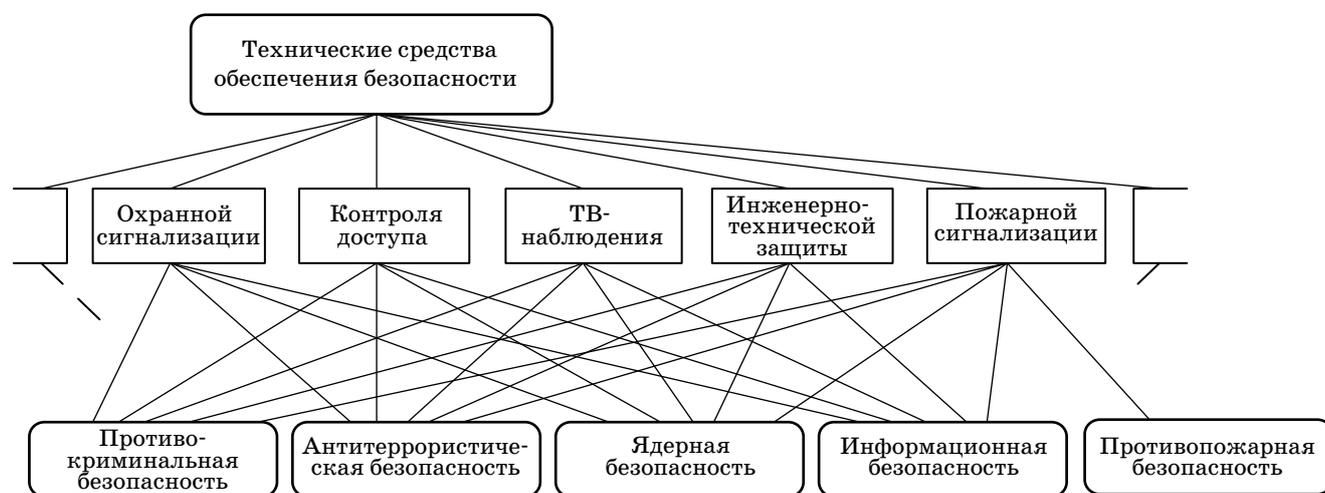
Наиболее полно и логично с научно-методической точки зрения термины, связанные с обеспечением ФЗ, сформулированы применительно к задачам ФЗ информации как одного из видов защиты информации (ЗИ). Это же можно сказать и о вопросах защиты ядерных объектов в силу их чрезвычайной важности (возможности нанесения не просто существенных, а катастрофических потерь). Однако о других проблемно-ориентированных областях этого сказать нельзя — термины, определяющие ФЗ и СФЗ, либо практически не используются, либо имеют другой, зачастую принципиально отличный смысл.

В соответствующих документах [1—3] даны определения рассматриваемых терминов для задач ЗИ. И это в определенной степени понятно, поскольку задачи ЗИ требуют использования практически всех МСОБ, так как обеспечение ЗИ невозможно без обеспечения безопасности собственно объекта информатизации и средств обработки и хранения информации, находящихся на

нем, в отличие от частных задач, к примеру, обеспечения безопасности только материальных ресурсов.

Нужно отметить и тот факт, что на настоящем уровне развития системы безопасности объекты информатизации становятся наиболее общими и сложными (с точки зрения обеспечения безопасности), требующими применения наибольшего перечня МСОБ. Ведь современные объекты в большинстве случаев являются в той или иной степени объектами информатизации. Так, любой, даже небольшой офис или квартира сейчас немыслимы без компьютерных средств обработки, хранения и передачи информации. Можно ли решить задачу информационной безопасности серверной как объекта информатизации, например, без контроля окружающей температуры (повышение которой может вызвать выход из строя оборудования) или учета риска затопления?

Еще одна сторона рассматриваемого вопроса состоит в том, что в современных условиях в значительном числе случаев трудно и обычно нецелесообразно разделять подсистемы безопасности или выполняемые ими функции. Так, для одного и того же объекта обеспечения безопасности одни и те же средства, к примеру, охранной сигнализации, контроля доступа, ТВ-наблюдения и др., могут решать задачи антитеррористической, противокриминальной, информационной и других видов безопасности. И, наоборот, материальные ресурсы могут быть объектом обеспечения безопасности, например информационной. Однако в некоторых задачах, в частности, в области средств противокриминальной безопасности (систем охранной сигнализации и др.) термин «физическая защита» практически не используется или ис-



■ Технические средства обеспечения безопасности

пользуется в другом смысле, отличном от задач информационной и ядерной безопасности.

Сказанное иллюстрирует рисунок, где представлен основной состав технических средств обеспечения физической безопасности — охранной и пожарной сигнализации, ТВ-наблюдения, контроля доступа, инженерно-технической защиты и т. д. А также показана необходимость использования перечисленных средств для решения различных прикладных задач обеспечения безопасности — противокриминальной, антитеррористической, информационной и др.

Очевидно, что одни и те же средства используются практически во всех задачах. А это также подтверждает целесообразность решения поставленной задачи — формулировки единых терминов.

Известные определения для предметно-ориентированных приложений

Проанализируем основные определения, касающиеся СФЗ, представленные в стандартах и специальной литературе. Как уже отмечалось, в основном приводятся определения, учитывающие специфику различных предметно-ориентированных отраслей.

Защита информации

Для задач ЗИ основными документами можно считать стандарты [1—3]. В них сформулированы следующие понятия и определения.

В соответствии со стандартом [1], термин «защита информации» включает четыре понятия: правовую, криптографическую, техническую и физическую защиту информации.

Физическая защита информации определена как защита информации путем применения организационных мероприятий и совокупности средств, создающих препятствия для проникновения или доступа неуполномоченных физических лиц к объекту защиты. При этом:

1) организационные мероприятия по обеспечению ФЗ информации предусматривают установление режимных, временных, территориальных, пространственных ограничений на условия использования и распорядок работы объекта защиты;

2) к объектам ЗИ могут быть отнесены охраняемая территория, здание (сооружение), выделенное помещение, информация и (или) информационные ресурсы объекта информатизации.

В свою очередь термин «объект информатизации» раскрывается в ГОСТах [1, 3].

Объект информатизации [3] — совокупность информационных ресурсов, средств и систем об-

работки информации, используемых в соответствии с заданной информационной технологией, а также средств их обеспечения, помещений или объектов (зданий, сооружений, технических средств), в которых эти средства и системы установлены, или помещений и объектов, предназначенных для ведения конфиденциальных переговоров.

Объект информатизации защищаемый [1] — объект информатизации, предназначенный для обработки защищаемой информации с требуемым уровнем ее защищенности.

Техника ЗИ, среди прочих, включает ряд средств ФЗ информации на объекте, а именно [2]:

- охранную и охранно-пожарную сигнализацию;
- охранное телевидение и наблюдение;
- инженерно-техническую защиту объектов, а также управления, например, доступом к информации.

Отметим, что приведенные выше определение термина «объект информатизации» и состав техники ЗИ можно рассматривать как пример удачной формулировки ООБ и МСОБ. Формулировки общей и в то же время достаточно детализированной, учитывающей практически все аспекты конкретной прикладной задачи обеспечения информационной безопасности.

Однако с точки зрения общности имеет смысл учитывать вопросы защиты не только от проникновения или доступа неуполномоченных физических лиц, но и от других угроз (в общем случае произвольных), приводящих к существенным потерям.

Ядерная безопасность

Для ядерных объектов соответствующие термины приводятся в документах [5—9].

В соответствии с законом [5], *физическая защита* ядерных установок, радиационных источников, пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ предусматривает единую систему планирования, координации, контроля и реализации комплекса технических и организационных мер, направленных на:

- предотвращение несанкционированного проникновения на территорию ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения, предотвращение несанкционированного доступа к ядерным материалам и радиоактивным веществам, предотвращение их хищения или порчи;
- своевременное обнаружение и пресечение любых посягательств на целостность и сохранность ядерных материалов и радиоактивных веществ, своевременное обнаружение и пресечение диверсионных и террористических актов, угро-

жающих безопасности ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения;

— обнаружение и возвращение пропавших или похищенных ядерных материалов и радиоактивных веществ.

В документе [6] представлены следующие определения.

Физическая защита — совокупность организационных мероприятий, инженерно-технических средств и действий подразделений охраны в целях предотвращения диверсий или хищений ядерных материалов.

Система физической защиты ядерно-опасных объектов и радиационно-опасных объектов — совокупность организационных мероприятий, инженерно-технических средств и действий подразделений охраны, предназначенных для обеспечения физической защиты ядерных материалов, ядерных установок, радиоактивных веществ, радиационных источников.

В постановлении [7] приведены другие определения.

Физическая защита — деятельность в области использования атомной энергии, осуществляемая в целях предотвращения диверсий и хищений в отношении ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения.

Система физической защиты представляет собой единую систему планирования, координации, контроля и реализации комплекса технических и организационных мер для осуществления физической защиты.

Также к отрасли ядерной безопасности относятся следующие определения [10].

Физическая защита — совокупность организационных мероприятий, инженерно-технических средств и действий подразделений охраны в целях предотвращения диверсий или хищений.

Система физической защиты — система организационных, административных и правовых мер и инженерно-технических средств, предназначенных для обеспечения физической защиты ядерных материалов и ядерных установок на конкретном ядерном объекте.

Задачи ФЗ на ядерном объекте [7]:

— предупреждение несанкционированных действий;

— своевременное обнаружение несанкционированных действий;

— задержка (замедление) проникновения (продвижения) нарушителя;

— реагирование на несанкционированные действия и нейтрализация нарушителей для пресечения несанкционированных действий.

В постановлении [7] также приведен состав средств СФЗ. Так, *инженерными средствами* СФЗ являются физические барьеры, посты охраны и

инженерное оборудование охраняемых зон и постов охраны. *Техническими средствами* СФЗ являются элементы и устройства, входящие в состав следующих основных функциональных систем:

— охранной сигнализации;

— тревожно-вызывной сигнализации;

— контроля и управления доступом;

— оптико-электронного наблюдения и оценки ситуации;

— оперативной связи и оповещения (в том числе средств проводной связи и радиосвязи);

— защиты информации;

— обеспечения электропитания, освещения.

В документе [8] рассмотрены требования к СФЗ и ее составным частям. В частности, согласно данному документу, *система физической защиты* является частью общей системы организационно-технических мер, осуществляемых на ядерных объектах в целях обеспечения безопасности деятельности в области использования атомной энергии.

Общие технические требования к техническим средствам ФЗ ядерных объектов и к составным частям СФЗ устанавливает стандарт [9], в том числе требования надежности, эргономики, технологичности, комплектности.

Отметим имеющийся, на наш взгляд, недостаток с точки зрения общности определений в области ядерной безопасности, заключающийся в том, что практически во всех определениях угрозой ООБ считаются неуполномоченные физические лица (нарушители). Однако очевидно, что есть и ряд других угроз, например, исходящих от сотрудников, т. е. формально уполномоченных для доступа лиц, или природного характера.

Противокриминальная защита

В области противокриминальной защиты или, как ее еще называют, охраны термин «физическая защита» в смысле, определенном стандартами в области информационной безопасности, практически не используется. Хотя применяются те же самые технические средства. Ряд схожих по звучанию терминов и понятий предлагается в различных публикациях.

Так, в учебном пособии [12], посвященном системам охранной сигнализации, система обеспечения безопасности объекта определяется как совокупность *физической защиты, инженерной защиты, технической защиты и специальной защиты*. Автор использует следующие определения перечисленных терминов.

Физическая защита обеспечивается службой охраны, основной задачей которой является предупреждение несанкционированного физического проникновения на территорию, в здания и

помещения объекта злоумышленников и их сдерживание в течение расчетного времени (до прибытия полиции или сил поддержки).

Инженерная защита предусматривает использование усиленных дверей и дверных коробок, металлических решеток, усиленных ограждающих конструкций, усиленных запоров, сейфов повышенной стойкости.

Техническая защита включает систему охранной сигнализации, систему телевизионного наблюдения, систему тревожного оповещения, автоматизированную систему контроля доступа, переговорные устройства, средства связи, пожарной сигнализации, средства проверки почтовой корреспонденции, охранного освещения, резервного (аварийного) электропитания, систему дежурного и тревожного освещения.

Специальная защита обеспечивает защиту от утечки информации, представляющей особую ценность, а также проверку надежности (лояльности) персонала службы охраны, материально ответственных лиц и некоторых других категорий служащих.

Заметим, что термины «физическая защита» и «техническая защита», используемые в работе [12], принципиально расходятся с рассмотренными выше формулировками стандартов для задач ЗИ и ядерной безопасности.

Общие определения

Рассмотрим еще несколько определений, которые обладают определенной степенью общности и могут быть отнесены к разным предметно-ориентированным областям, например, противокриминальной, антитеррористической и другим видам защиты.

В работе [11] даются следующие определения.

Система физической защиты представляет собой совокупность правовых норм, организационных мер и технических решений, направленных на защиту жизненно важных интересов и ресурсов охраняемого объекта от угроз, источниками которых являются несанкционированные воздействия физических лиц.

Безопасность объекта физическая — состояние защищенности жизненно важных интересов (объекта) от угроз, источниками которых являются злоумышленные противоправные (несанкционированные) действия физических лиц (нарушителей).

С точки зрения общности формулировок может быть полезным определение системы безопасности [13], применимое к любым предметно-ориентированным областям: *система безопасности* — это совокупность всех методов и средств, обеспечивающих поддержание безопасного состояния объекта, предотвращение, обнаружение

и ликвидацию угроз жизни, здоровью, среде обитания, имуществу и информации.

В рассматриваемом определении можно отметить один, возможно спорный, момент: весь этот перечень ООБ формально можно сократить до понятия «ресурсы», которые могут быть людскими, информационными, материальными, природными, финансовыми, транспортными и др. Однако перечень в определении не учитывает некоторые виды ресурсов, например транспортные или финансовые. Поэтому имеет смысл дополнить перечень словом «ресурсами». Но в силу важности и специфики обеспечения безопасности каждой из первых четырех составляющих их целесообразно включать в определение, не обобщая.

Основываясь на этом общем определении системы безопасности, можно выделить следующие составляющие этого определения применительно к СФЗ как частному случаю системы безопасности:

- объект физической защиты;
- угрозы этому объекту;
- средства (технические и программные) и методы (правовые нормы, организационные мероприятия и т. п.) ФЗ объекта.

Антитеррористическая защита

Наиболее близкими к рассматриваемым терминам в области антитеррористической безопасности можно считать следующие.

Обеспечение антитеррористической защищенности — реализация совокупности проектных решений, организационно-технических и специальных мероприятий, направленных на обеспечение безопасности здания (сооружения) в целях предотвращения совершения террористического акта и (или) минимизации его последствий [14].

Система обеспечения антитеррористической защищенности — организационно-техническая система, включающая в себя совокупность технических систем антитеррористической защищенности, технических средств или их комплексов, программное обеспечение, а также документированные процедуры штатных действий персонала, эксплуатационную документацию, материалы, инструменты, приборы, необходимые для использования в антитеррористической защищенности объекта [15].

Антитеррористическая защищенность объекта — состояние здания, строения, сооружения или иного объекта, при котором обеспечивается безопасность его функционирования посредством применения инженерно-технических и режимных мер, направленных на предотвращение совершения террористического акта [15].

Эти определения по сути совпадают с определениями из области ядерной и информационной

безопасности, хотя по формулировкам имеют достаточно заметные различия.

Терминология в иностранной литературе

В зарубежной литературе используются нижеперечисленные основные термины.

Физическая защита (Physical Protection) — это характеристика ядерных энергетических систем, которая определяет степень противодействия краже материалов, пригодных для ядерных взрывных устройств или устройств рассеивания радиации, а также саботажу объектов и транспортировке межнациональными организациями и другими внешними нарушителями [16].

Система физической защиты (Physical Protection System) — совокупность людей, процедур и оборудования для физической защиты имущества или сооружений [17].

Физическая охрана (безопасность) (Physical Security) характеризует меры, разработанные для ограничения несанкционированного доступа персонала (в том числе атакующих или даже случайных злоумышленников) в здание, на объект, к ресурсам или хранимой информации, а также определяет правила по разработке структуры противодействия потенциально враждебным действиям [18].

Физическая защита (Physical Security) — это защита персонала, оборудования, программ, сетей и данных от физических явлений и событий, которые могут привести к существенным потерям или нанести урон предприятию, учреждению или организации. Она включает защиту от пожара, стихийных бедствий, хищения, кражи со взломом, вандализма и терроризма [19].

Перевод этих терминов свидетельствует об их близости к терминам, рассмотренным выше для обеспечения ЗИ и ядерной безопасности.

Заметим, что определение *системы физической защиты*, данное в стандарте [15], является наиболее общим, относящимся к любым объектам.

Анализируя все вышесказанное, можно сделать выводы о следующих особенностях существующих определений:

- наличие ограничений в существующей терминологии, в частности, учитывающих не все угрозы;

- наличие явного разночтения в трактовке одинаковых терминов в разных областях, в различных документах и разными авторами;

- отсутствие единых терминов, применимых с необходимыми уточнениями, к разным предметно-ориентированным областям;

- наличие наиболее корректной терминологии в области ЗИ, что позволяет взять эти определения за основу.

Все это в целом подтверждает целесообразность поставленной авторами в работе задачи.

Предлагаемые термины

Обоснуем и сформулируем максимально общие определения ФЗ и СФЗ, которые, при необходимости, могли бы служить для формулировки частных и более детальных определений для предметно-ориентированных областей. Анализируя определения, приведенные выше, можно сделать вывод, что термины «физическая защита» или «система физической защиты» используются в четырех смысловых значениях:

- 1) защита от физических лиц;
- 2) защита физическими лицами (сотрудниками служб охраны);
- 3) использование физических препятствий (и как следствие — задержки для их преодоления) для достижения цели нарушителем (угрозой);
- 4) обеспечение физической целостности объектов.

Можно говорить о том, что в той или иной мере правильны все смысловые значения, но применительно только к конкретным предметно-ориентированным задачам. Кроме того, они учитывают не все угрозы. Проанализируем эти смысловые понятия.

В первом пункте угрозой считаются только физические лица, хотя очевидно, что угрозы могут исходить не только от физических и не только от неуполномоченных лиц. Имеется ряд других угроз, аналогичных по наносимому ущербу, а зачастую и превосходящих его. И угроз не только прямых, но и опосредованных. Примерами могут служить ситуации на Чернобыльской АЭС (реализовавшаяся угроза — уполномоченные лица — персонал) и АЭС «Фокусима» (реализовавшаяся угроза — природное явление). Таким образом, подобное ограничение перечня угроз снижает общность определений, поскольку одни и те же последствия могут быть при реализации разных угроз.

Второй пункт представляется также частным случаем, поскольку сотрудники службы охраны составляют лишь часть системы обеспечения физической безопасности и практически всегда используются в сочетании с техническими средствами.

Третий также является частным случаем, так как препятствия, создающие задержку в развитии угрозы, могут быть не только физические, а, например, программные, организационные и др. Кроме того, только одними препятствиями задача физической защиты не решается.

Поэтому последнее смысловое значение — *обеспечение физической целостности ООБ* — представляется наиболее правильным и общим, так

как определяет объект защиты от произвольных в общем случае угроз.

К такому же выводу можно прийти и путем других рассуждений. Выделим главное, суть, которая должна определять понятия. Нет сомнения, что главное — это *объект защиты* (объект обеспечения безопасности), поскольку все делается ради этого объекта. Поэтому, по нашему мнению, надо говорить, прежде всего, о *сохранении физической целостности объекта защиты* или связанных с ним и влияющих на его физическую целостность составляющих (например, окружающей среды). Так, применительно к задачам ЗИ — это объект информатизации, включая носители и средства обработки информации.

Более того, в рассмотренных выше терминах ЗИ и ядерной безопасности явно прослеживается задача сохранения физической целостности ООБ.

Таким образом, можно дать следующие определения ФЗ и СФЗ.

Физическая защита — это совокупность действий по обеспечению физической целостности ООБ.

Система физической защиты — это совокупность методов и средств обеспечения физической целостности ООБ.

При этом под различными составляющими определения будем понимать следующее:

- совокупность методов — правовые, организационные, юридические, морально-этические и другие методы, необходимые для решения задачи;

- совокупность средств — средства, необходимые для решения задачи, такие как аппаратные, программные и инженерно-технические. Применительно к конкретным средствам, используемым в настоящее время, они наиболее полно определены в стандарте [2];

- физическая целостность — учитывает кроме собственно физической целостности также изменение взаимного пространственного расположения различных элементов ООБ без нарушения целостности каждого из элементов (например, в случае кражи — это перемещение объекта);

- объект обеспечения безопасности — жизнь, здоровье, среда обитания, имущество, информация [13] и ресурсы.

Вышесказанное практически полностью согласуется с определениями стандартов (в первую очередь, [1, 2]) с учетом конкретизации объекта обеспечения физической безопасности и частного случая угроз (нарушителя).

Сформулируем перечень основных средств ФЗ ООБ с учетом приведенных в документах [2, 7]:

- охранная сигнализация;
- пожарная сигнализация;
- ТВ-наблюдение;

- контроль доступа;
- инженерно-техническая защита;
- обеспечение (связи, энергопитания, транспорта и т. п.).

Остановимся еще на одном понятии, не относящемся к техническим средствам ФЗ, но напрямую связанном с такой важной составляющей обеспечения безопасности, как реагирование на угрозы, — персонал служб безопасности. Тем более, что это трактуется некоторыми авторами как собственно ФЗ [12].

В документе [4] дается два схожих смысловых значения определений. *Силы службы безопасности* — силы охраны на ядерном объекте, в чьи обязанности входит первыми нанести ответный удар в случае атаки. *Силы ответного действия* — персонал охраны, немедленно принимающий ответные действия, направленные на отражение угрозы, исходящей от нарушителя.

Обобщая эти определения на произвольные ООБ и угрозы, можно дать соответствующее определение.

Средства реагирования — ресурсы системы безопасности (персонал, технические, программные, инженерные и организационные средства) для реагирования на возможную или возникшую угрозу ООБ.

Авторы осознанно включили в определение не только персонал охраны, но и технические, программные, инженерные и организационные средства, поскольку сейчас все большее распространение получают автоматизированные и автоматические средства реагирования на угрозы. Например, средства автоматизированного пожаротушения и дымоудаления или средства нелетального воздействия на нарушителя.

Заключение

В настоящей работе получены следующие основные результаты.

1. Проанализированы основные термины стандартов, руководящих документов и работ различных авторов в областях обеспечения информационной, ядерной и других видов безопасности.

2. Показано разночтение одних и тех же терминов, использующихся в разных предметных областях и сформулированных разными авторами, а также недостаточная общность определений.

3. Показана целесообразность разработки общих терминов, применимых не только для задач обеспечения информационной и ядерной безопасности, но и для любых других задач.

4. Предложены обоснованные определения ФЗ и СФЗ, с одной стороны, согласующиеся с руководящими документами и стандартами в пред-

метно-ориентированных областях и, с другой стороны, являющиеся общими и позволяющие устранить разночтения в терминологии в области методов и средств обеспечения физической безопасности.

5. Сформулирован состав технических средств СФЗ и его взаимосвязь с техническими средствами объединенной системы безопасности.

Литература

1. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения: введ. 01.02.2008. – М.: Стандартинформ, 2008. – 8 с.
2. ГОСТ Р 52069.0-2003. Защита информации. Система стандартов. Основные положения: введ. 01.01.2004. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 12 с.
3. ГОСТ Р 51275. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения: введ. 01.02.2008. <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=129071> (дата обращения: 12.11.2012).
4. **Soo Hoo**. English/Russian and Russian/English Glossary of Physical Protection Terms. – Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), 1995. – 103 p.
5. **Федеральный закон** от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» // Собрание законодательства Российской Федерации. 1995. № 48. С. 45–52.
6. **РД-07-01-2004**. Методические указания по проведению оценки состояния физической защиты ядерно- и радиационно-опасных объектов по результатам проведенной инспекции: введ. 01.01.2005. www.russgost.ru (дата обращения: 12.11.2012).
7. **Постановление** Правительства РФ от 19.07.2007 № 456 «Об утверждении Правил физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов». www.referent.ru (дата обращения: 12.11.2012).
8. **НП-083-07**. Требования к системам физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов: введ. 01.06.2008 // Ядерная и радиационная безопасность. 2008. № 2. С. 15–30.
9. ГОСТ Р 52860-2007. Технические средства физической защиты. Общие технические требования:

В заключение отметим, что хотя авторы и старались максимально аргументировать свое мнение, они не считают предложенные термины окончательной версией. Работа в определенной степени носит дискуссионный характер, авторы готовы к обсуждению этого вопроса и с удовольствием выслушают замечания заинтересованных специалистов.

введ. 27.12.2007. – М.: Стандартинформ, 2008. – 27 с.

10. **Бондарев П. В.** и др. Физическая защита ядерных объектов / МИФИ. – М., 2004. – 489 с.
11. **Алаухов С. Ф., Коцербуба В. Я.** Концепция безопасности и принципы создания систем физической защиты важных промышленных объектов / ФГУП «НИКИРЭТ», 2005. www.sec.ru (дата обращения: 11.11.2012).
12. **Магауренов Р. Г.** Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: учеб. пособие. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 367 с.
13. **Волхонский В. В.** Системы охранной сигнализации. 2-е изд., доп. и перераб. – СПб.: Экополис и культура, 2005. – 204 с.
14. **СП 132.13330.2011**. Обеспечение антитеррористической защищенности зданий и сооружений. Общие требования проектирования: свод правил: введ. 20.09.2011. – 6 с.
15. **СТО – П-119-01-05.2012**. Обеспечение антитеррористической защищенности зданий и сооружений. Общие требования: утвержден 04.05.2012. – 43 с.
16. **Bari R.** et al. Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Development and Applications / Brookhaven National Laboratory, 2009. – P. 61–69.
17. **Fedrick Charlie, Matthew Brayon**. Physical Protection Principles / Nuclear Installation Dept. AELB. – Retrieved: <http://www.aelb.gov.my> (дата обращения: 11.11.2012).
18. **Edward J. Conrath** et al. Structural Design for Physical Security: State of the Practice / Task Committee, Structural Engineering Institute, ASCE Reston, 1999. – 264 p.
19. **missinglinksecurity.com**: Missing Link Security. <http://www.missinglinksecurity.com/> (дата обращения: 15.11.2012).

УДК 621.397

КОДИРОВАНИЕ С НЕРАВНОЙ ЗАЩИТОЙ КОМПРЕССИРОВАННОГО ВИДЕО В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Ф. А. Таубин,

доктор техн. наук, профессор

А. В. Чуйков,

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается схема передачи компрессированного видео, базирующаяся на разбиении битового потока в видеокодере на подпотоки (с учетом степени важности основных синтаксических единиц) и последующем помехоустойчивом кодировании с неравной защитой подпотоков от канальных ошибок. Для кодирования с неравной защитой используется класс совместимых по скорости перфорированных кодов повторения-накопления (RA-кодов), позволяющих обеспечить высокую помехоустойчивость и обладающих весьма привлекательными обменными соотношениями «помехоустойчивость — сложность реализации». Предлагается подход к согласованному выбору основных параметров рассматриваемой схемы передачи, включающий, в частности, обмен между скоростью компрессированного видео и скоростями RA-кодов.

Ключевые слова — потоковое видео, беспроводные сети, пиковое отношение сигнал/шум, помехоустойчивое кодирование с неравной защитой, коды повторения-накопления.

Введение

Передача потокового видео и обеспечение доступа к видеосервисам составляют доминирующую долю трафика в локальных и региональных беспроводных сетях [1]. Можно выделить несколько важных обстоятельств, связанных с реализацией доставки видеоконтента. Во-первых, в настоящее время в большинстве беспроводных сетей используются, как правило, протоколы передачи, не предусматривающие наличие QoS (Quality of Service) механизмов. Во-вторых, ограниченная полоса частот в канале диктует необходимость передачи видеоконтента в компрессированном виде. В-третьих, компрессированное видео весьма чувствительно к канальным ошибкам. Действительно, даже одиночная ошибка в компрессированном битовом потоке может привести к появлению последовательности, не восстанавливаемой видеодекодером, что в свою очередь может вызвать остановку декодирования. Кроме того, обратной стороной предикативного кодирования, используемого при компрессии, является пространственно-временное размножение ошибок. В результате обеспечение надежной доставки компрессирован-

ного видео (в отсутствие QoS-гарантии) оказывается весьма актуальной и перспективной задачей.

Стандартным инструментом обеспечения надежной передачи является использование помехоустойчивого кодирования. К настоящему времени предложено множество схем, демонстрирующих эффективность введения помехоустойчивого кодирования при пакетной передаче компрессированного видео (см. например, работы [2–6]). Среди предложенных схем следует выделить, как наиболее перспективные, методы передачи, основанные на использовании помехоустойчивого кодирования с неравной защитой [4–6]. Более высокая эффективность схем кодирования с неравной защитой достигается благодаря учету структуры компрессированного видео, и в частности — учету неравной значимости различных синтаксических элементов битового потока с точки зрения защиты от канальных ошибок.

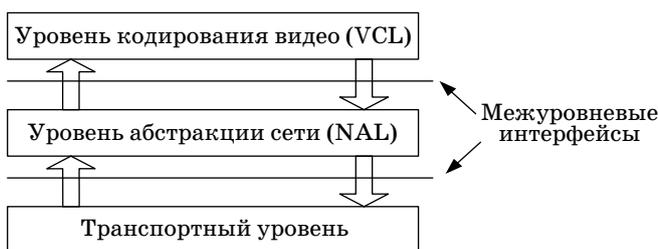
Как правило, при анализе схем с неравной защитой основное внимание уделялось кодовым конструкциям, основанным на совместимых по скорости сверточных кодах или турбокодах. В данной работе рассматривается метод передачи компрессированного видео с неравной защитой, базирующийся

ся на использовании совместимых по скорости кодов повторения-накопления, которые обладают рядом существенных достоинств по сравнению со сверточными кодами и турбокодами.

Структура компрессированного видео

Будем полагать, что компрессия видео осуществляется с использованием передового стандарта HEVC (High Efficiency Video Coding) [7], позволяющего существенно повысить степень компрессии по сравнению с наиболее популярным в настоящее время стандартом H.264/AVC. Компрессированное видео, порождаемое HEVC-кодеком, имеет сложную иерархическую организацию битового потока, которая в первую очередь определяется тем, что функциональные возможности кодера, как и в стандарте H.264/AVC, концептуально разделены на два уровня (рис. 1): уровень кодирования (компрессии) исходного видео VCL (Video Coding Layer) и уровень сетевой абстракции NAL (Network Abstraction Layer), обеспечивающий форматирование компрессированного видео для последующей передачи по сети.

На уровне VCL реализуется стандартная (как и в H.264/AVC) схема гибридного кодирования, включающая предсказание, двумерное косинусное преобразование и арифметическое кодирование. В большинстве приложений исходная видеопоследовательность разбивается на группы кадров GoP (Group of Pictures) и каждая группа кодируется независимо от других групп, что позволяет ограничить временное размножение ошибок. Для ограничения пространственного размножения ошибок каждый кадр сегментируется на части, называемые кодируемыми элементами. Кодируемый элемент представляет собой дерево, состоящее из квадратных блоков различного размера; при этом каждый кодируемый элемент может быть рекурсивным образом разбит с помощью четверичной сегментации на поддерева меньшего размера. Другими словами, кодируемый элемент представляет совокупность блоков различного размера, связанных между собой дре-

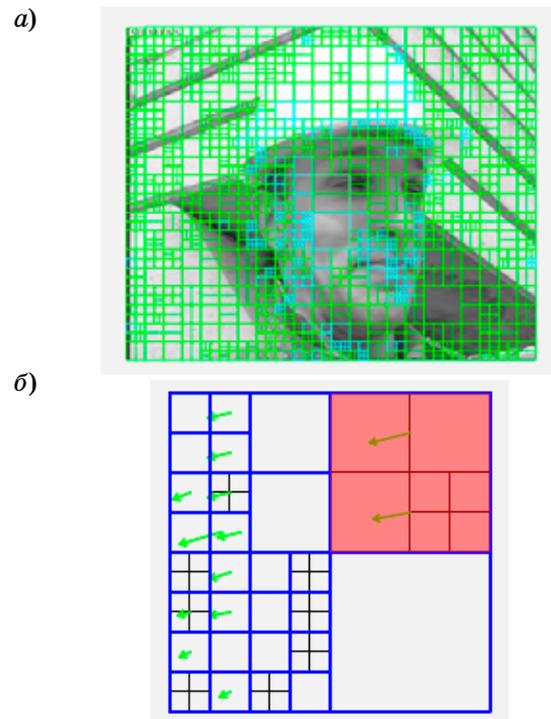


■ Рис. 1. Разделение функций в видеокодере

вовидной структурой (СТВ — Coding Tree Block) (рис. 2, а). В свою очередь, СТВ разбиваются на более мелкие единицы вплоть до так называемых единиц преобразования (TU — Transformation Unit) (рис. 2, б). Следует отметить, что новая терминология, используемая в HEVC для описания кодируемых элементов, пока не имеет общепринятого перевода на русский язык, поэтому для удобства изложения кодируемый элемент будем называть макроблоком (как в H.264/AVC).

В простейшем варианте битовый поток, соответствующий макроблоку, формируется как кодированная последовательность I- (интра) и P- (предсказанных) блоков. Каждый I-блок кодируется независимо, а при кодировании P-блока учитываются как предыдущие, так и последующие I- и (или) P-блоки. Очевидно, что с точки зрения защиты от канальных ошибок I-блоки являются более важными, чем P-блоки.

Уровень сетевой абстракции NAL разработан как дружественный протокол для хранения, передачи по сети и инкапсуляции с другими протоколами (например, RTP (Real-time Transport Protocol)). Протокол NAL форматирует компрессированное видео, определяя минимальный набор правил для надежного транспортирования потока, получаемого от VCL, по различным сетям.



■ Рис. 2. Иерархическое разбиение яркостной компоненты в HEVC: а — разбиение кадра на кодируемые элементы в виде СТВ; б — разбиение СТВ на TUs (с векторами компенсации)

Маркер синхронизации	Заголовок видеопакета	Данные СТВ макроблока
----------------------	-----------------------	-----------------------

■ Рис. 3. Структура видеопакета

Компрессированные видеоданные представляются в виде единиц NAL, называемых NALU (NAL Unit), каждая из которых является пакетом, состоящим из целого числа байт. Заголовок NALU, состоящий из первых двух байт, предназначен для описания типа данных. Остальные байты NALU представляют собой собственно видеoinформацию, определяемую заголовком. Единица NAL представляет единый формат как для байтового потока, так и для пакетной передачи.

Форматированный поток представляет собой последовательность видеопакетов. Для потоковых транспортных протоколов, таких как H.320 или H.324M, при форматировании в состав видеопакета включается стартовый код (рис. 3), позволяющий транспортному уровню и декодеру легко идентифицировать структуру битового потока. При работе с пакетно-ориентированными протоколами, таки-

ми как RTP/IP и TCP/IP, NAL форматирует компрессированное видео без включения в видеопакеты стартовых кодов. В этом случае определение границ единиц NAL производится фрагментацией транспортного протокола системы.

С точки зрения защиты от канальных ошибок синтаксические элементы каждого макроблока, очевидно, имеют различную степень важности. Исходя из этого в HEVC-кодеке (как и в стандарте H.264/AVC) предусмотрена возможность разбиения содержимого блоков (Data Partition Mode) на три составных фрагмента (A, B и C) с учетом значимости данных, включаемых в каждый фрагмент. Полученные в результате разбиения три подпоток — A, B и C соответственно, кодируются отдельно, после чего инкапсулируются — каждый подпоток в свой собственный NAL-пакет, порождая соответственно NAL-A, NAL-B и NAL-C пакеты. В простейшем сценарии разбиения макроблоков пакет NAL-A содержит информацию о параметрах квантования и векторах компенсации движения, тогда как пакеты NAL-B и NAL-C несут информацию о текстуре для интраблоков и интерблоков соответственно (рис. 4).



■ Рис. 4. Простейший вариант разбиения макроблоков



■ Рис. 5. Схема инкапсуляции компрессированного видео

Общая схема инкапсуляции компрессированного видео применительно к передаче в беспроводной сети показана на рис. 5. Инкапсуляция осуществляется различными уровнями операционной системы путем добавления на каждом уровне необходимых заголовков и выполнения сегментации данных. Процедура RoHC (Robust Header Compression) осуществляет компрессию заголовков пакетов транспортного уровня.

Разбиение компрессированного битового потока на подпотоки

Включение опции Data Partition Mode позволяет организовать неравную защиту подпотоков А, В и С (с учетом степени их важности) от канальных ошибок и тем самым более эффективно использовать избыточность, вносимую при введении помехоустойчивого кодирования. Степень влияния канальных ошибок на отдельные синтаксические элементы компрессированного видео определяется, очевидно, структурой HEVC-кодека.

Эвристический анализ процесса функционирования HEVC-кодека при наличии канальных ошибок показывает, что декодер в результате ошибок в пакетах или потери фрагмента может вести себя в соответствии с одним из следующих сценариев:

1) декодировать компрессированное видео либо без ошибок (например, если ошибки/потери затронули данные, не участвующие в декодировании), либо с ошибками, порождающими локальные искажения восстановленного видео;

2) декодировать компрессированное видео с ошибками, порождающими существенные искажения восстановленного видео, включая полное искажение кадров;

3) остановить процесс декодирования.

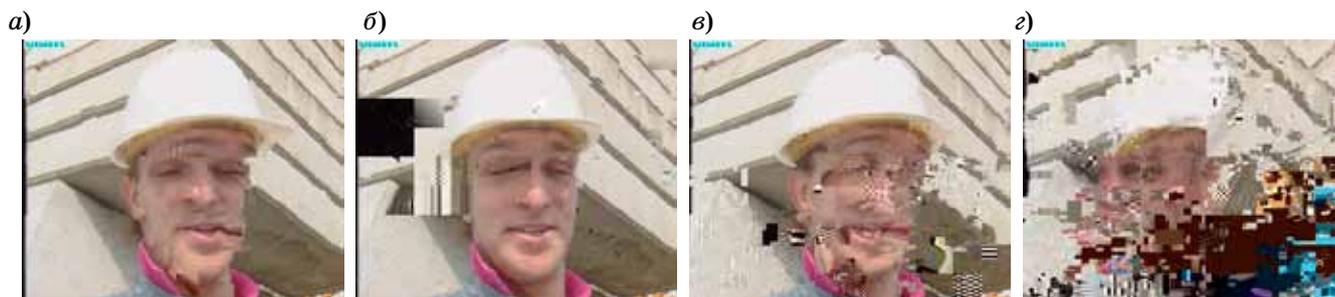
Первый сценарий поведения декодера реализуется, как правило, при появлении ошибок в DC- и AC-компонентах двумерного косинусного преобразования блоков. Второй сценарий поведения декодера вызывают ошибки в векторах ком-

пенсации и заголовках макроблоков. К останову декодера приводят ошибки в заголовках RTP-пакетов и единиц NAL. Типичные искажения, характерные для первого и второго вариантов локализации ошибок, иллюстрируют рис. 6, а—г.

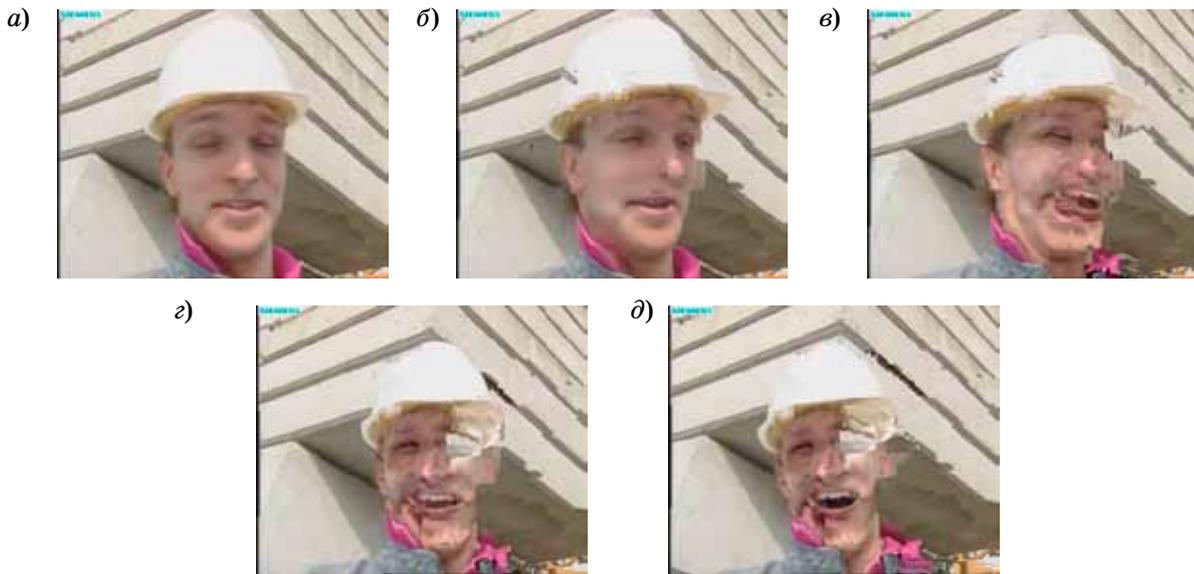
Следует отметить, что степень размножения искажений, вызываемых канальными ошибками, существенным образом зависит от количества кадров L , входящих в GoP. Дело в том, что канальные ошибки в начале GoP порождают более сильные искажения видео, чем ошибки в конце GoP, и степень искажений возрастает с увеличением размера GoP. Например, ошибка в первом Р-кадре после I-кадра приведет к искажению всех последующих кадров в GoP, тогда как канальная ошибка в последнем Р-кадре не приведет к искажению остальных кадров. Другими словами, начальные кадры GoP оказываются более значимыми (с точки зрения их влияния на степень размножения искажений), чем последующие, и степень дифференциации кадров GoP в этом смысле возрастает с увеличением размера GoP. Типичные искажения, вызываемые канальными ошибками в начале и в конце группы кадров GoP, показаны на рис. 7, а—д.

Характер локализации канальных ошибок внутри кадра также может влиять на степень порождаемых ими искажений. Так, если канальные ошибки поражают макроблок в начале кадра, то декодер теряет синхронизацию (вследствие использования кода с переменной длиной) и прекращает декодирование текущего видеокadra. Если же канальные ошибки попали на макроблоки, расположенные ближе к концу кадра, то подавляющую часть кадра декодер сможет успешно восстановить. Другими словами, макроблоки в начале кадра оказываются более значимыми, чем последующие макроблоки.

С учетом приведенных выше результатов эвристического анализа процесса функционирования HEVC-кодека представляется рациональным следующий вариант использования опции Data Partition Mode. Подпоток А наиболее значимых данных (биты класса А) включает:



■ Рис. 6. Иллюстрация искажений, порождаемых ошибками в векторах компенсации (а); заголовках макроблоков (б); в коэффициентах текстуры яркостных (в) и цветоразностных (г) компонент



■ **Рис. 7.** Иллюстрация искажений, порождаемых канальными ошибками:
a — в начале GoP; *б* — в кадре № 4 (первая ошибка); *в* — кадре № 12; *г* — кадре № 20; *д* — кадре № 28

- 1) размер изображения;
- 2) порядок следования кадров в GoP;
- 3) информацию о профиле;
- 4) глубину иерархии преобразования (Intra и Inter);
- 5) значения шага квантования.

Следующий по значимости данных подпоток В (биты класса В) включает:

- 1) результаты предсказания яркостных компонент;
- 2) коэффициенты двумерного косинусного преобразования для Intra и Inter (без знаков);
- 3) номер последнего значащего коэффициента в блоке (Intra).

Подпоток С наименее чувствительных более к канальным ошибкам данных (биты класса С) включает:

- 1) номер последнего значащего коэффициента в блоке (Inter);
- 2) векторы компенсации;
- 3) знаки коэффициентов двумерного косинусного преобразования для Intra и Inter;

- 4) направление предсказания цветоразностных компонент.

Отметим, что текстура I-кадров не включена в подпоток А по двум причинам. Во-первых, ее значимость, как показали наши эксперименты, все же заметно меньше, чем значимость заголовков RTP-пакетов и единиц NAL. Во-вторых, наличие канальных ошибок диктует необходимость ограничения количества кадров L в GoP сравнительно небольшими значениями, что в свою очередь нивелирует в известной степени разность в значимости I-кадра и последующих P-кадров. При сопоставлении искажений видео, вызываемых канальными ошибками в текстуре и векторах компенсации, оказалось, что в первом случае степень искажений заметно больше. Поэтому текстура включена в подпоток В, а векторы компенсации — в подпоток С. Для предложенного варианта разбиения компрессированного видеопотока на подпоток характерны а) весьма малая относительная доля α_A подпотока А и б) примерно сопоставимые по объему относительные

■ **Таблица 1.** Доли подпотоков А, В и С для клипа Foreman

Подпоток	Относительные доли подпотоков, %, при скорости компрессированного видео							
	$R=1500$ Кбит/с				$R=1700$ Кбит/с			
	$L=4$	$L=8$	$L=16$	$L=32$	$L=4$	$L=8$	$L=16$	$L=32$
α_A	1,29	0,75	0,36	0,16	1,20	0,73	0,36	0,35
α_B	51,36	39,74	44,07	52,73	53,31	42,16	44,36	40,94
α_C	47,35	59,51	55,57	47,11	45,49	57,11	55,28	58,71

■ Таблица 2. Доли подпотоков А, В и С при количестве кадров в GoP $L=16$

Скорость компрессированного видео R , Кбит/с	Относительные доли подпотоков, %		
	α_A	α_B	α_C
1000	0,47	40,58	58,95
1300	0,43	41,89	57,68
1500	0,36	44,07	55,57
1700	0,36	44,36	55,28

доли α_B и α_C подпотоков В и С соответственно. В табл. 1 приведены данные, иллюстрирующие типичные значения относительных долей подпотоков А, В и С для тестового клипа Foreman. Этот клип имеет разрешение CIF (352×288 пикселей, 8 бит на отсчет, формат YCbCr 4:2:0) и частоту кадров $f=30$ кадров/с.

Видно, что доля подпотока А уменьшается с увеличением количества кадров в GoP, тогда как соотношение α_B и α_C не имеет явно выраженной тенденции. Представляется правдоподобным, что ситуация, когда $\alpha_B < \alpha_C$, более предпочтительна при кодировании с неравной защитой в силу того, что подпоток С требует сравнительно меньшей защиты от канальных ошибок. В этом плане следует выделить вариант, соответствующий $L=16$ (табл. 2), для которого в широком диапазоне скоростей компрессированного видео условие $\alpha_B < \alpha_C$ выполняется с заметным перевесом доли подпотока С — отношение α_B/α_C находится в диапазоне от 1,25 до 1,45.

Помехоустойчивое кодирование подпотоков

Один из наиболее перспективных подходов к организации помехоустойчивого кодирования с неравной защитой основан на использовании совместимых по скорости перфорированных кодов [8–10]. Совокупность совместимых по скорости перфорированных кодов порождается низкоскоростным материнским кодом и конструируется в виде иерархии вложенных кодов, формируе-

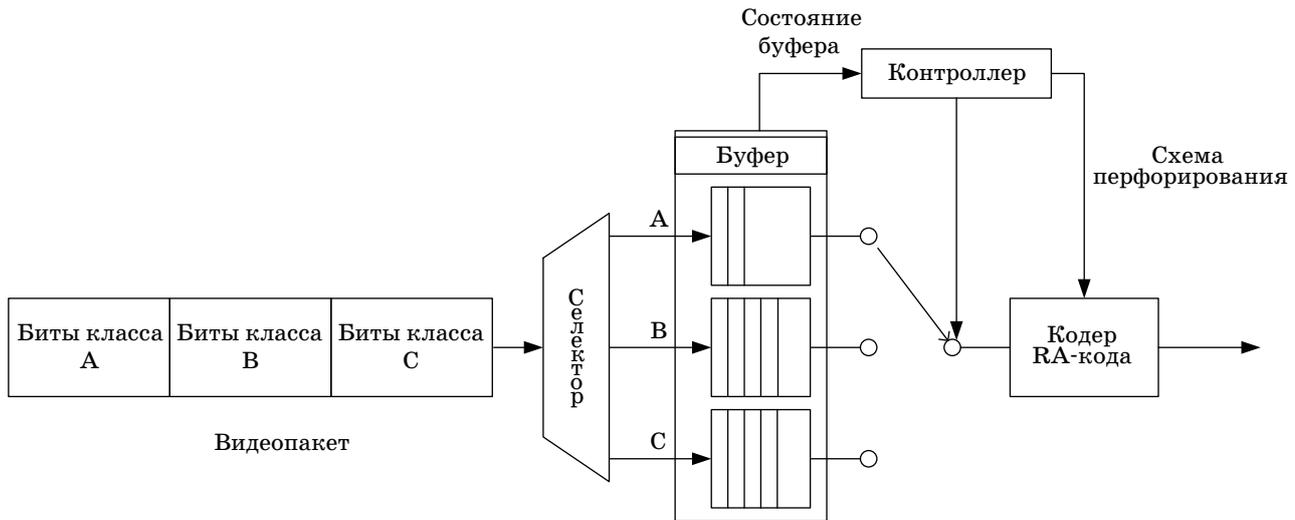
мой посредством последовательного перфорирования (выкалывания) части символов материнского кода. Коды в иерархии упорядочены по скоростям таким образом, что код с большей скоростью вложен в коды с меньшей скоростью. Другими словами, все кодовые биты кода с большей скоростью используются каждым кодом в этой иерархии, имеющим меньшую скорость. Важным достоинством совместимых по скорости перфорированных кодов является то, что как кодирование, так и декодирование всех кодов из этой совокупности выполняется кодером и декодером, имеющими универсальную структуру.

Среди предложенных к настоящему времени совместимых по скорости перфорированных кодов наиболее предпочтительным для организации неравной защиты подпотоков представляется класс кодов, в которых материнскими являются коды повторения-накопления (Repeat-Accumulate — RA). RA-коды [11] обеспечивают помехоустойчивость, сопоставимую с помехоустойчивостью, достигаемой при использовании как низкоплотностных, так и турбокодов, и при этом имеют линейную сложность кодирования и линейную сложность декодирования. Схема кодера RA-кода приведена на рис. 8.

RA-код представляет собой каскадную конструкцию, состоящую из двух весьма простых кодов, разделенных перемежителем; в этой конструкции внешним кодом является код с q -кратным повторением, а внутренним кодом (накопительным звеном) — рекурсивный сверточный код со скоростью 1 и передаточной характеристикой $1/(1+z)$. Таким образом, скорость материнского RA-кода равна $1/q$. Семейство совместимых по скорости кодов порождается из материнского RA-кода путем перфорирования а) информационных символов, б) символов на выходе внешнего кодера и в) символов на выходе внутреннего кодера. Схемы перфорирования (puncturing patterns) выбираются, как правило, на основе EXIT chart-анализа, позволяющего оптимизировать характеристики кодов. Кодер RA-кода может быть представлен с помощью графической модели —



■ Рис. 8. Кодер RA-кода



■ Рис. 9. Схема помехоустойчивого кодирования с неравной защитой

графа Таннера, что означает возможность декодирования RA-кодов с использованием итеративного алгоритма распространения доверия (Belief Propagation — BP), оперирующего с графом Таннера.

Схема помехоустойчивого кодирования с неравной защитой для компрессированного видео приведена на рис. 9. Битовый поток, представляющий собой последовательность видеопакетов, с выхода видеокодера поступает на вход селектора, где каждый видеопакет разбивается на фрагменты А, В и С в соответствии с изложенной выше процедурой реализации опции Data Partition Mode. Подпотoki, формируемые селектором, буферизуются и поочередно кодируются — каждый подпоток с использованием своего вложенного кода. Данные из буферов считываются блоками, имеющими длину k_A , k_B и k_C соответственно, при этом кодовые блоки для всех подпотоков имеют одну и ту же длину n . В приемнике декодированные блоки с выхода универсального RA-декодера распределяются между тремя буферами, после чего мультиплексируются в единый поток.

Обозначим через $r_A = k_A/n$, $r_B = k_B/n$ и $r_C = k_C/n$ скорости RA-кодов, используемых для помехоустойчивого кодирования подпотоков А, В и С соответственно. Тогда результирующая скорость битового потока, отправляемого в канал, составляет $R(\alpha_A/r_A + \alpha_B/r_B + \alpha_C/r_C)$.

Совместный выбор параметров схемы передачи с неравной защитой подпотоков

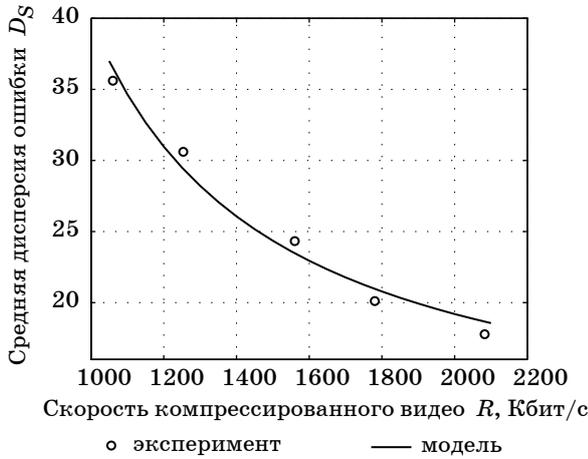
Качество передачи видео, как правило, оценивается пиковым отношением сигнал/шум (Peak

Signal-to-Noise Ratio — PSNR), определяемым как $PSNR = 10 \log_{10}(255/D)$ [дБ], где D — средняя (приходящаяся на один пиксель) дисперсия ошибки между исходным и принятым видео. Величина D весьма сложным образом зависит от параметров схемы передачи, включающей видеокодек, каналный кодек и беспроводную среду передачи. Поэтому во многих публикациях при исследовании качества передачи видео принимается ряд допущений, вполне обоснованных как эмпирически, так и посредством моделирования. Суть этих допущений сводится к использованию аддитивных моделей для учета искажений, возникающих как при компрессии, так и при передаче по каналу. Основное допущение состоит в том, что средняя дисперсия ошибки D может быть аппроксимирована суммой $D_S + D_C$, где D_S — средняя дисперсия ошибки, возникающая при компрессировании видео, а D_C — средняя дисперсия ошибки, порождаемая каналным шумом [12–14], так что оценивание средней дисперсии ошибки D сводится к оцениванию величин D_S и D_C . В работе [12] предложена модель, позволяющая связать дисперсию ошибки D_S и скорость компрессированного видео R в следующем виде:

$$D_S = D_0 + \theta(R - R_0), \tag{1}$$

где D_0 , R_0 и θ — параметры модели, определяемые свойствами компрессируемого видео, размером GoP и долей I-кадров. На рис. 10 представлен результат аппроксимации моделью (1) экспериментально вычисленных значений средней дисперсии ошибки D_S для тестового клипа Foreman.

Вычисление средней дисперсии ошибки, порождаемой каналным шумом, в общем случае



■ Рис. 10. Аппроксимация дисперсии ошибки D_S моделью (1) для клипа Foreman

представляет собой весьма сложную задачу. В качестве первого приближения для оценки величины D_C может быть применена предложенная в работе [12] техника оценивания, базирующаяся на использовании аддитивной модели для учета влияния канальных ошибок. Согласно этой технике, если канальная ошибка порождает в I-кадре искажение со средней дисперсией (на пиксель) σ_I^2 , то результирующая средняя дисперсия ошибки (с учетом размножения искажений внутри GoP) может быть оценена в виде

$$n_I P_e \sigma_I^2 \sum_{j=0}^{L-1} (1-j/L)/(1+\gamma_I j), \quad (2)$$

где n_I — среднее количество канальных ошибок, приходящихся на I-кадр; P_e — вероятность канальной ошибки; $\gamma_I, \gamma_I \in [0, 1]$ — параметр, зависящий от выбранного метода компенсации движения и схемы маскирования искажений. Использование подобного подхода для оценки величины D_C применительно к рассматриваемой модели передачи сводится к следующему.

1. Оценивание средней дисперсии ошибки (с учетом размножения искажений внутри GoP), порождаемой ошибкой в каждом из подпотоков. Обозначим эти величины как σ_A^2, σ_B^2 и σ_C^2 соответственно; отметим, что набор $(\sigma_A^2, \sigma_B^2, \sigma_C^2)$ можно интерпретировать как своего рода чувствительность пары «клип-видеокодек» к канальным ошибкам в подпотоках.

2. Использование аддитивной модели для учета искажений, порождаемых ошибками на выходе канальных декодеров для подпотоков А, В и С. Полученные в результате оценки величин σ_A^2, σ_B^2 и σ_C^2 имеют следующий вид:

$$\sigma_A^2 \approx \sigma_{IA}^2 \beta \sum_{j=0}^{L-1} \frac{1-j/L}{1+\gamma_{IA} j} + \sigma_{PA}^2 \frac{1-\beta}{L-1} \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{j=l}^{L-1} \frac{1-j/l}{1+\gamma_{PA} j}, \quad (3)$$

$$\sigma_B^2 \approx \sigma_{IB}^2 \beta \sum_{j=0}^{L-1} \frac{1-j/L}{1+\gamma_{IB} j} + \sigma_{PB}^2 \frac{1-\beta}{L-1} \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{j=l}^{L-1} \frac{1-j/l}{1+\gamma_{PB} j}; \quad (4)$$

$$\sigma_C^2 \approx \sigma_{IC}^2 \beta \sum_{j=0}^{L-1} \frac{1-j/L}{1+\gamma_{IC} j} + \sigma_{PC}^2 \frac{1-\beta}{L-1} \sum_{l=1}^{L-1} \sum_{j=l}^{L-1} \frac{1-j/l}{1+\gamma_{PC} j}, \quad (5)$$

где β — относительный объем, занимаемый кодированными I-кадрами в общем битовом потоке; σ_{IA}^2 — средняя (на пиксель) дисперсия искажения в I-кадре, порождаемая ошибкой на выходе канального декодера подпотока А; σ_{PA}^2 — средняя (на пиксель) дисперсия искажения в Р-кадре, порождаемая ошибкой на выходе канального декодера подпотока А (аналогичным образом определяются величины $\sigma_{IB}^2, \sigma_{PB}^2, \sigma_{IC}^2$ и σ_{PC}^2).

Оценка порождаемой канальным шумом средней дисперсии ошибки D_C , полученная в рамках аддитивной модели, имеет вид

$$D_C \approx \frac{RL}{f} [\alpha_A P_{eA} \sigma_A^2 + \alpha_B P_{eB} \sigma_B^2 + \alpha_C P_{eC} \sigma_C^2], \quad (6)$$

где f — частота кадров в видеопоследовательности; P_{eA}, P_{eB}, P_{eC} — вероятности ошибки на бит для канальных декодеров подпотоков А, В и С соответственно.

Для RA-кодов аналитические границы вероятности ошибки декодирования в настоящее время не известны. Вместе с тем при передаче по каналу с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) и значениях вероятности ошибки на бит P_e в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-9} зависимость P_e от отношения сигнал/шум на символ h [дБ] можно достаточно точно аппроксимировать в виде

$$P_e \approx \exp_{10}[-u(r, n)h + v(r, n)], \quad (7)$$

где коэффициенты $u(r, n)$ и $v(r, n)$ определяются скоростью r и длиной кодового блока n RA-кода. Например, для рассматриваемого в работе материнского RA-кода со скоростью $r=1/2$ и длиной кодового блока $n=1024$ коэффициенты $u(r, n)$ и $v(r, n)$ принимают значения 5,1 и -9,6 соответственно.

Комбинируя выражения (1), (6) и (7), получаем следующую оценку для средней дисперсии ошибки:

$$D \approx D_0 + \theta/(R - R_0) + \frac{RL}{f} [\alpha_A P_{eA} \sigma_A^2 + \alpha_B P_{eB} \sigma_B^2 + \alpha_C P_{eC} \sigma_C^2], \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} Pe_A &\approx \exp_{10}[-u(r_A, n)h + v(r_A, n)], \\ Pe_B &\approx \exp_{10}[-u(r_B, n)h + v(r_B, n)], \\ Pe_C &\approx \exp_{10}[-u(r_C, n)h + v(r_C, n)], \end{aligned}$$

а величины σ_A^2 , σ_B^2 и σ_C^2 оцениваются правыми частями в (3), (4) и (5) соответственно.

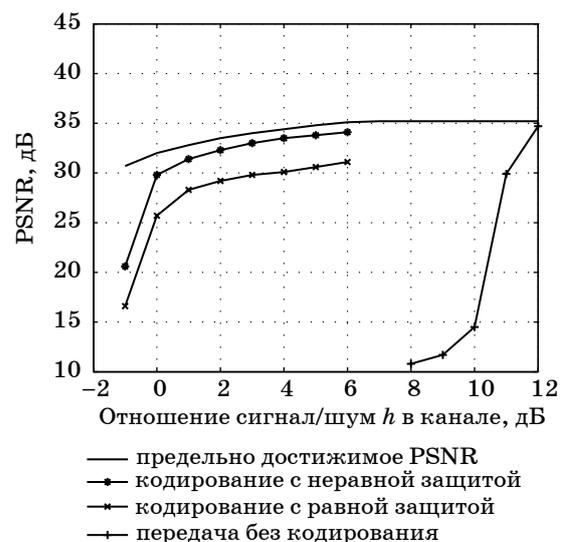
Наличие оценки (8) позволяет сформулировать задачу согласованного выбора основных параметров схемы передачи компрессированного видео по каналу с АБГШ. Под основными параметрами будем понимать размер GoP L , скорость компрессированного видео R и скорости r_A , r_B и r_C кодов, используемых для кодирования подпотоков; обозначим набор этих параметров как $\mathbf{S} = (L, R, r_A, r_B, r_C)$. Согласованный выбор параметров подразумевает такой выбор набора \mathbf{S} , который для заданного отношения сигнал/шум h в канале минимизирует правую часть (8) при выполнении следующих двух условий. Во-первых, результирующая скорость передачи не должна превышать заданной скорости передачи V в канале, т. е. $R(\alpha_A/r_A + \alpha_B/r_B + \alpha_C/r_C) \leq V$. Во-вторых, длина кодового блока n используемого материнского RA-кода должна быть ограничена сверху величиной, определяемой, исходя из допустимых значений задержки и сложности декодирования. Отметим, что представленный подход к согласованному выбору параметров может быть распространен, с использованием результатов работы [15], на топологии с промежуточными и interfering узлами.

Оценка эффективности введения неравной защиты подпотоков

Сложность выражений, связывающих PSNR в доставленном видео и параметры схемы передачи с неравной защитой, препятствует получению достаточно наглядных аналитических оценок эффективности использования такой схемы применительно к произвольному видео (или некоторому классу видеопоследовательностей). В этой ситуации разумным компромиссом представляется получение численных оценок эффективности применительно к конкретным тестовым видеоклипам. В качестве примера рассмотрим согласованный выбор параметров в рамках обсуждаемой схемы при передаче тестового клипа Foreman между двумя узлами Wi-Fi сети со скоростью $V = 2$ Мбит/с. Будем полагать, что interfering и промежуточные узлы отсутствуют, что позволяет использовать модель канала с АБГШ. Допустимая длина кодового блока $n = 1024$, а скорости r_A , r_B и r_C кодов, используемых для кодирования подпотоков, выбираются из множества $\{s/(s+1) | 1 \leq s \leq 9\}$. Значения PSNR

в доставленном видео, соответствующие согласованному выбору параметров, приведены на рис. 11. Для сравнения на этом же рисунке приведены значения PSNR, получаемые а) при кодировании с равной защитой, б) при передаче без введения кодирования и в) при передаче со скоростью, сколь угодно близкой к пропускной способности канала (предельно достижимые значения PSNR). Представленные на рис. 11 результаты позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, при передаче без кодирования удается обеспечить приемлемое качество доставленного видео лишь при отношении сигнал/шум в канале $h > 10,5$ дБ, тогда как при использовании RA-кодов этот порог снижается до $-0,5 \dots 0$ дБ. Во-вторых, кодирование с неравной защитой обеспечивает выигрыш примерно в 4 дБ относительно кодирования с равной защитой. В-третьих, при отношении сигнал/шум в канале $h \geq 0$ дБ схема кодирования с неравной защитой обеспечивает качество, достаточно близкое к предельно возможному — разница составляет от 1,1 до 2,3 дБ.

С прикладной точки зрения при передаче видео в беспроводной сети более наглядными (по сравнению с графиками на рис. 11) могут оказаться характеристики, иллюстрирующие качество принятого видео в зависимости от расстояния между передающим и приемными узлами. Соотношение между мощностью принятого сигнала и расстоянием между узлами определяется моделью, характеризующей степень ослабления сигнала при его распространении в пространстве. В работе далее рассматриваются три популярные



■ Рис. 11. Значения PSNR в доставленном видео в зависимости от отношения сигнал/шум в канале (клип Foreman, скорость передачи $V = 2$ Мбит/с)

щиты, должным образом согласованной а) со скоростью компрессированного видео, б) со степенью чувствительности доставленного получателю видео к ошибкам при передаче и в) с отношением сигнал/шум в канале, позволило более эффективно использовать избыточность, вносимую при введении помехоустойчивого кодирования. Пример с передачей стандартного тестового клипа Foreman показывает, что кодирование с неравной защитой обеспечивает выигрыш по PSNR (в доставленном видео) примерно 4 дБ относительно кодирования с равной защитой. Важно также отметить, что рассматриваемая схема кодирования с неравной защитой обеспечивает качество, достаточно близ-

кое к предельно возможному — разница составляет от 1,1 до 2,3 дБ при отношении сигнал/шум в канале $h \geq 0$ дБ. При фиксированном значении PSNR в доставленном видео эффективность предложенной схемы кодирования с неравной защитой может быть оценена степенью увеличения максимально возможного расстояния между передающим и приемным узлами. Так, для трех рассмотренных в работе моделей ослабления сигнала в канале при требуемом значении PSNR=30 дБ возрастание максимальной дальности составляет от 38 до 137 % по сравнению с вариантом некодированной передачи и от 11 до 27 % по сравнению со схемой кодирования с равной защитой.

Литература

1. Cai L., Shen X., Mark J. W. *Multimedia Services in Wireless Internet: Modeling and Analysis*. – Wiley, 2009. – 290 p.
2. Nafaa A., Taleb T., Murphy L. Forward Error Correction Strategies for Media Streaming over Wireless Networks // *IEEE Communication Magazine*. Dec. 2007. P. 72–79.
3. Xiao J., Tillo T., Lin C., Zhao Y. Real-Time Forward Error Correction for Video Transmission // *Proc. of IEEE Conf. on Visual Communications and Image Processing VCIP'11*, Nov. 2011. P. 1–4.
4. Wang X., Tang K., Cui H. A Novel Unequal Error Protection Scheme for ROI based Video Coding in H.264/AVC // *Proc. of the Second Intern. Conf. on Computer Modeling and Simulation ICCMS'10*, Jan. 2010. P. 175–178.
5. Lamy-Bergot C., Chaunru N., Bergeron C. Unequal Error Protection for H.263+Bitstreams over a Wireless IP Networks // *Proc. of the IEEE ICASSP'06 Conf.*, Toulouse, May 2006. P. 377–380.
6. Stockhammer T., Bystrom M. H.264/AVC Data Partitioning for Mobile Video Communication // *Proc. of the Intern. Conf. on Image Processing*, Singapore, 2004. P. 545–548.
7. Sullivan G. J. et al. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. Dec. 2012. Vol. 22. N 12. P. 1649–1668.
8. Hagenauer J. Rate-Compatible Punctured Convolutional Codes (RCPC Codes) and their Applications // *IEEE Transactions on Communications*. Apr. 1988. Vol. 36. N 4. P. 389–400.
9. Barbulescu A. S., Pietrobon S. S. Rate-Compatible Turbo Codes // *Electronics Letters*. Mar. 1995. Vol. 31. N 7. P. 535–536.
10. Kim J., Ramamoorthy A., McLaughlin S. W. The Design of Efficiently-Encodable Rate-Compatible LDPC Codes // *IEEE Transactions on Communications*. Feb. 2009. Vol. 57. N 2. P. 365–375.
11. Planjery S., Gulliver T. A., Thangaraj A. Rate-Compatible Punctured Systematic Repeat-Accumulate Codes // *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, Mar. 2007. P. 718–722.
12. Stuhmuller K., Farber N., Link M., Girod B. Analysis of Video Transmission over Lossy Channels // *IEEE J. on Selected Areas in Communications*. June 2000. Vol. 18. N 6. P. 1012–1032.
13. He Z. H., Cai J. F., Chen C. W. Joint Source Channel Rate-Distortion Analysis for Adaptive Mode Selection and Rate Control in Wireless Video Coding // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. June 2002. Vol. 12. P. 511–523.
14. Dani J. U., He Z. H., Xiong Z. Transmission Distortion Modeling for Wireless Video Communications // *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conf. GLOBECOM'05*, Dec. 2005. P. 2425–2428.
15. Таубин Ф. А., Чуйков А. В. Анализ качества передачи потокового видео в беспроводных AD-НОС-сетях // *Информационно-управляющие системы*. 2012. № 2. С. 39–47.
16. Erceg V. et al. An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments // *IEEE J. on Selected Areas in Communications*. July 1999. Vol. 17. N 7. P. 1205–1211.

УДК 510.6:683.3:531

УПРАВЛЕНИЕ ЖИВУЧЕСТЬЮ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

А. Е. Городецкий,

доктор техн. наук, профессор

И. Л. Тарасова,

канд. техн. наук, доцент

В. Ю. Зиняков,

аспирант

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Рассматривается метод управления живучестью сложной системы с использованием моделированного изменения вероятности отказа с течением времени и деградации системы. Предлагается подход к проблеме учета связей между блоками сложной системы. Описывается алгоритм моделирования, сочетающий логико-вероятностное и логико-лингвистическое прогнозирование процессов изменения параметров во времени. Использование моделирования позволяет получить резерв времени на проведение необходимых операций по управлению живучестью системы и тем самым повысить ее надежность.

Ключевые слова — сложная логическая функция, логико-вероятностное моделирование, логико-лингвистическое моделирование, прогнозирование, управление сложной системы.

Введение

К основным принципам, которые используются для управления живучестью сложных систем, относятся адаптация; динамический естественный отбор, или горячее резервирование; стресс; компенсация и заимствование; ступор, или включение аварийного режима [1]. При отклонениях внутреннего состояния системы из-за различных поломок и отказов для обеспечения живучести традиционно используется принцип горячего резервирования, аналогичный динамическому естественному отбору, существующему в живых организмах. Сигналом для включения механизма динамического естественного отбора, т. е. переключения каналов и блоков на резервные, служит наблюдаемое превышение сверх допустимых норм изменений внутреннего состояния блоков, которое может оцениваться по величине математического ожидания (МО) их параметров или вероятности отказа [2].

Задача обеспечения живучести или надежности функционирования системы, когда отклонение внутреннего состояния превышает допустимые пределы, поставлена достаточно давно и в значи-

тельной степени изучена [3]. Однако при оценке изменения во времени сложной логической функции, описывающей отказ системы с учетом связей между блоками, за исключением простейших схем, возникают определенные сложности и неоднозначности [4]. Проблема учета влияния параметров одних блоков системы на параметры связанных с ними блоков при вычислении изменения вероятности отказа сложной системы с течением времени ее эксплуатации до сих пор не имеет приемлемого для практики решения [5], так как аналитический учет данного факта в сложной системе неизбежно приводит к весьма трудоемким вычислениям. Рассмотрим один из возможных подходов к проблеме учета связей между блоками сложной системы.

Упрощенный учет связей между блоками сложной системы

Очевидно, что с течением времени эксплуатации T сложной системы вероятности безотказной работы ее блоков $P_{i\ 60}(T)$ убывают по экспоненциальному закону [6]:

$$P_{i\ 60}(t_i) = \exp(-\alpha_{i0}t_i), \quad (1)$$

где t_i — время эксплуатации i -го блока системы; a_{i0} — коэффициент убывания, который может быть найден из уравнения (1), так как обычно для блоков системы задаются наработка на отказ t_{i0} и вероятность безотказной работы $P_{i\ 60}(t_{i0})$ в этот момент времени.

Указанное убывание вероятностей может характеризоваться соответствующим изменением МО их параметров [6]:

$$P_{i0}(T) = 1 - \Phi((b_i - m_i) / \sigma_i) + \Phi((-b_i - m_i) / \sigma_i) = 1 - P_{i\ 60}(t_i), \quad (2)$$

где b_i — предельно допустимое значение i -го параметра; m_i — МО i -го параметра; σ_i — среднеквадратическое отклонение (СКО) i -го параметра; $\Phi(x)$ — интеграл вероятности, который не выражается через элементарные функции, но существуют таблицы его значений [7] либо его приближенные выражения в виде ряда с убывающими членами.

Обычно для каждого блока известны начальные значения величин $P_{i\ 60}$, b_i и m_{i0} , поэтому величина СКО σ_i для каждого блока может быть вычислена из соотношений

$$P_i(-\infty) = \Phi_i(-b_i) = \Phi_i((b_i - m_{i0}) / \sigma_i) - \Phi_i(-\infty) = (1 - P_{i\ 60}(t_i)) / 2; \quad (3)$$

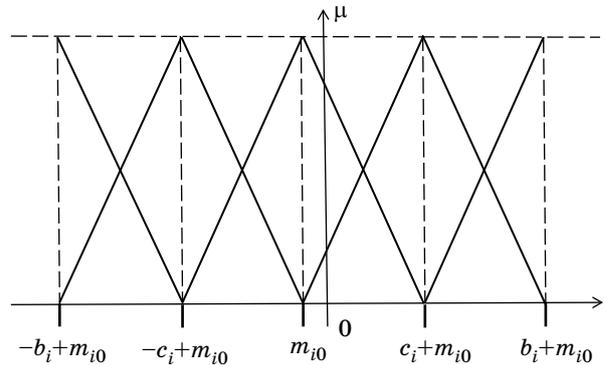
$$\Phi(-\infty) = 0. \quad (4)$$

Также очевидно, что приближение МО параметров i -го блока к опасному (критическому) c_i и, тем более, предельно допустимому b_i значению сказывается и на изменении параметров связанных с ними блоков. Например, изменение выходного напряжения блока питания естественно приводит к изменению коэффициента усиления связанного с ним блока усиления [7]. Поскольку аналитический учет взаимного влияния блоков приводит к сложным вычислениям, предлагается следующий упрощенный подход к данной проблеме.

При попадании МО $m_i(t_i)$ параметров какого-либо i -го блока в некоторый момент времени его эксплуатации t_{ik} в опасную зону $c_i \leq |m_i| < b_i$ для этого блока устанавливаем коэффициенты

$$w(i) = 2, u(i) = 3,$$

где $w(i)$ — характеристика состояния i -го оборудования ($w(i) = 0$ — аварийный, $w(i) = 2$ — опасный, $w(i) = 1$ — нормальный); $u(i)$ — характеристика удаленности i -го оборудования от аварийного или опасного оборудования ($u(i) = 0$ — удаленность более чем через один, $u(i) = 1$ — удаленность через один, $u(i) = 2$ — непосредственно связанный, $u(i) = 3$ — непосредственно сам).



■ Рис. 1. Фаззификация

После этого осуществляем сдвиг МО

$$m_i = m_i + \sigma_i w(i) u(i) m_i \mu(m_i), \quad (5)$$

где $\mu(m_i)$ — функция принадлежности текущего значения МО тому или иному интервалу, которая вычисляется в соответствии со следующими правилами (рис. 1):

- 1) если $-\infty \leq m_i < -b_i + m_{i0}$, то $\mu(m_i) = 1$;
- 2) если $-b_i + m_{i0} \leq m_i \leq -c_i + m_{i0}$, то $\mu(m_i) = \max((m_i - m_{i0} + c_i) / (c_i - b_i); ((m_i - m_{i0} + b_i) / (b_i - c_i)))$;
- 3) если $-c_i + m_{i0} \leq m_i \leq m_{i0}$, то $\mu(m_i) = \max((-m_i + m_{i0}) / c_i; (m_i - m_{i0} + c_i) / c_i)$;
- 4) если $m_{i0} \leq m_i < c_i + m_{i0}$, то $\mu(m_i) = \max((-m_i + m_{i0} + c_i) / c_i; (m_i - m_{i0}) / c_i)$;
- 5) если $c_i + m_{i0} \leq m_i \leq b_i + m_{i0}$, то $\mu(m_i) = \max((m_i - m_{i0} - b_i) / (c_i - b_i); (m_i - m_{i0} - c_i) / (b_i - c_i))$;
- 6) если $b_i + m_{i0} \leq m_i \leq \infty$, то $\mu(m_i) = 1$.

Затем устанавливаются j -е номера блоков, непосредственно связанных с блоком, параметры которого попали в опасную зону, и для них присваиваем значения коэффициентов связи $u(j) = 1$, $w(j) = 2$ и также осуществляем сдвиг МО:

$$m_j = m_j + \sigma_j w(j) u(j) m_j \mu(m_j), \quad (6)$$

где $\mu(m_j)$ вычисляется по тем же правилам вида 1–6.

После этого определяем номера q -х блоков, связанных с найденным i -м, через один блок и для них устанавливаем $w(q) = 1$, $u(q) = 1$, и также осуществляем сдвиг МО:

$$m_q = m_q + \sigma_q w(q) u(q) m_q \mu(m_q). \quad (7)$$

Если теперь, после пересчета МО, окажется, что у какого-то блока его абсолютное значение будет больше допустимого значения ($|m_i| > b_i$), то этот блок признается неработоспособным, вероятность его отказа приравнивается единице ($P_{i0} = 1$)

и, соответственно, приравнивается единице вероятность отказа всей системы ($P_0 = 1$). В противном случае следует вычислить, исходя из новых значений МО, значения вероятностей отказов всех блоков по формуле (2), а затем вычислить вероятность отказа всей системы, используя, например, полиномиальную формулу [7]

$$P_0 = (-1)^0 \sum_i (P_{i0}(T)) + (-1)^1 \sum_{ij} (P_{i0}(T)P_{j0}(T)) + (-1)^2 \sum_{ijk} (P_{i0}(T)P_{j0}(T)P_{k0}(T)) + \dots + \prod_i (P_{i0}(T)). \quad (8)$$

Таким образом, в предлагаемом варианте учета связей между блоками системы при наступлении опасной ситуации скачком изменяют МО параметров данного и связанных с ним блоков, что позволяет в первом приближении учесть взаимовлияния параметров блоков на изменения вероятности отказов в процессе эксплуатации системы.

Моделирование изменения во времени вероятности отказа сложной системы с резервированием блоков

При моделировании изменения во времени вероятности отказа сложной системы с резервированием блоков будем считать, что система содержит N_o основных и N_p резервных блоков, и требуется определить изменение вероятности отказа $P_c\{y=1\}$ системы с течением времени T ее эксплуатации, если известны:

— структура системы, по которой строится таблица связей между блоками;

— время наработки на отказ каждого i -го блока системы t_{i0} ;

— начальная вероятность безотказной работы каждого i -го блока системы $P_i(t_{i0})$;

— максимально допустимое (критическое) отклонение параметров i -го блока системы b_i , превышение которого говорит об отказе блока ($z_i=1$ — отказ i -го блока);

— опасное отклонение параметров i -го блока системы c_i , превышение которого приводит к скачкообразному увеличению отклонения параметров связанных блоков;

— отклонение параметров i -го блока системы d_i , превышение которого говорит о необходимости замены основного блока на резервный.

В системе с резервированием отказ системы означает, что

$$y = (z_{1o} \wedge z_{1p}) \wedge (z_{2o} \wedge z_{2p}) \wedge (z_{3o} \wedge z_{3p}) \wedge \dots \wedge (z_{N_o} \wedge z_{N_p}) = 1, \quad (9)$$

где z_{io} — отказ i -го основного блока и z_{ip} — отказ i -го резервного блока системы.

Поэтому для вычисления вероятности отказа системы, характеризующей ее надежность, в момент времени T надо вначале вычислить вероятности конъюнктивных элементов в уравнении (9):

$$P_i\{z_{io} \wedge z_{ip} = 1\} = P_{io}\{z_{io} = 1\} \cdot P_{ip}\{z_{ip} = 1\} = \dots = P_{io}(T_{io}) \cdot P_{ip}(T_{ip}) = P_i(T), \quad (10)$$

где T_{io} , T_{ip} — время работы i -го основного и резервного блоков соответственно.

При этом:

1) поскольку нас интересует приближение блоков к аварийной ситуации, когда $c_i < |m_i| < b_i$, где c_i — опасное значение параметра, b_i — критическое значение параметра, либо наступления аварийного состояния, когда $|m_i| > b_i$, в этих случаях в уравнении $P_o(T) = 1 - \Phi((b-m)/\sigma) + \Phi((-b-m)/\sigma)$ можно пренебречь значением $\Phi((-b_i-m)/\sigma_i)$, так как $\Phi((-b_i-m)/\sigma_i) < \Phi((b_i-m)/\sigma_i)$. Следовательно, можно считать, что $P_{io}(T_{io}) = \Phi((b_i-m_{io}(T_{io}))/\sigma_{io})$ и $P_{ip}(T_{ip}) = \Phi((b_i-m_{ip}(T_{ip}))/\sigma_{ip})$. Если i -й резервный блок не подключен, то $T_{ip} = 0$ и $P_{ip}(T_{ip}) = 0$;

2) если нет i -го резервного блока, то $P_{ip}(T_{ip}) = 1$;

3) если у какого-либо i -го основного блока нет резервного блока и у этого блока $P_{io}(T_{io}) = 1$ (отказ блока), то $P_c\{y=1\} = 1$;

4) если нет ни одного i -го блока, у которого $P_{io}(T_{io}) = 1$ и $P_{ip}(T_{ip}) = 1$, то

$$P_c\{y=1\} = P_c(T) = (-1)^0 \sum_i (P_i(T)) + (-1)^1 \sum_{ij} (P_i(T)P_j(T)) + (-1)^2 \sum_{ijk} (P_i(T)P_j(T)P_k(T)) + \dots + \prod_i (P_i(T)); \quad (11)$$

5) если у какого-либо i -го основного блока в какой-либо ij -й момент времени T_{ij} отклонения параметров превысят значение d_i , то если есть резервный блок, его замещают этим блоком, для него устанавливают $P_{io}(T_{io}) = 1$, а для резервного блока устанавливают $T_{ip} = T - T_{ij}$. Тогда $P_i(T) = P_{ip}(T_{ip})$ и $P_c\{y=1\}$ также рассчитывают по формуле (11);

6) если после замещения основного блока на резервный $P_{ip}(T_{ip}) = 1$, то и $P_c\{y=1\} = 1$;

7) вероятности безотказной работы каждого i -го основного блока системы убывают с течением времени его эксплуатации t_i по экспоненциальному закону $P_{io}(T_{io}) = \exp(-a_{io}T_{io})$ (10), а вероятности безотказной работы каждого i -го резервного блока системы $P_{ip}(T_{ip})$ остаются постоянными до момента времени T_{ij} их подключения вместо основного, а затем убывают с течением времени их эксплуатации $T_{ip} = T - T_{ij}$ также по экспоненциальному закону вида (1).

Алгоритм моделирования изменения во времени вероятности отказа сложной системы с резервированием блоков

С учетом изложенного выше алгоритм моделирования будет следующим.

1. Задание начальных условий:

N — количество блоков в системе;

$\Phi(x)$ — нормальная функция распределения (задается в виде таблицы с линейной интерполяцией) [7];

V — системное время, $V := 0$;

T — время окончания моделирования;

Δ — шаг моделирования;

C — квадратная бинарная матрица порядка N , описывающая направленный граф соединений блоков системы;

$m_i(V)$ — МО состояния i -го блока до учета связей в момент времени V ;

$M_i(V)$ — приращение МО состояния i -го блока после учета связей в момент времени V ;

σ_i — СКО состояния i -го блока;

$P_i(V)$ — вероятность отказа i -го блока в момент времени V , $P_i(V) = P_i(0) = 0,004$ (по ГОСТ либо ТУ);

t_i — время наработки на отказ i -го блока (ГОСТ либо ТУ);

V_i — момент замены i -го блока запасным (0, если замена не была произведена), $V_i := 0$;

a_i — экспоненциальный коэффициент вероятности отказа i -го блока;

b — предельное значение параметров, означающее отказ i -го блока, $b = 0,15$;

c_i — значение параметров i -го блока, при котором блок считается находящимся в опасном состоянии;

d_i — значение параметров i -го блока, при котором блок меняется на запасной;

$\mu_i(V)$ — функция принадлежности i -го блока в момент времени V ;

$w_i(V)$ — коэффициент состояния блока в момент времени V ;

$u_i(V)$ — коэффициент близости опасных\критических i -х блоков в момент времени V ;

k_i — коэффициент резервирования i -го блока ($k_i = 0$ — нет резервного блока, $k_i = 1$ — имеется один резервный блок, $k_i = 2$ — имеются два резервных блока и т. д.);

$P(V)$ — вероятность отказа системы в момент времени V .

2. Вычисление СКО σ_i для каждого i -го блока:

— вычисляем $x_i = P_i(0)/2$;

— по таблице [7] определяем значения функции $\Phi(x_i)$;

— вычисляем $\sigma_i = -b/\Phi(x_i)$.

3. Вычисление экспоненциального коэффициента a_i для каждого i -го блока:

$$a_i = -1/t_i \cdot \ln(P_i(0)).$$

4. Вычисление вероятности отказа и математического ожидания $m_i(V)$ для каждого i -го блока в момент времени V :

— вычисляем $P_i(V) = \exp(-a_i(V - V_i))$;

— по таблице [4] определяем значения $\Phi(P_i(V))$;

— вычисляем $m_i(V) = b - \Phi(P_i(V))\sigma_i$.

5. Вычисление функции принадлежности для каждого i -го блока:

— если $m_i(V) \leq -3\sigma_i$, то $\mu_i(V) = 1$;

— если $m_i(V) > -3\sigma_i$ и $m_i(V) \leq -\sigma_i$, то

$$\mu_i(V) = \max(\mu_i([-3\sigma_i, -\sigma_i]), \mu_i([-2\sigma_i, -\sigma_i]));$$

— если $m_i(V) > -\sigma_i$ и $m_i(V) \leq 0$, то

$$\mu_i(V) = \max(\mu_i([- \sigma_i, 0]), \mu_i([0, \sigma_i]));$$

— если $m_i(V) > 0$ и $m_i(V) \leq \sigma_i$, то

$$\mu_i(V) = \max(\mu_i([0, \sigma_i]), \mu_i([\sigma_i, 2\sigma_i]));$$

— если $m_i(V) > \sigma_i$ и $m_i(V) \leq 3\sigma_i$, то

$$\mu_i(V) = \max(\mu_i([\sigma_i, 3\sigma_i]), \mu_i([\sigma_i, 2\sigma_i]));$$

— если $m_i(V) > 3\sigma_i$, то $\mu_i(V) = 1$;

— если $m_i(V) < -b$ или $m_i(V) > b$, то $w_i(V) = 0$ и $P_i(V) = 1$ $\{i$ -й блок неисправен};

— если $(m_i(V) > -b$ и $m_i(V) < -c_i)$ или $(m_i(V) > c_i$ и $m_i(V) < b)$, то $w_i(V) = 2$ $\{i$ -й блок в опасном состоянии};

— если $m_i(V) \geq -c_i$ или $m_i(V) \leq c_i$, то $w_i(V) = 1$ $\{$ блок исправен}.

6. Вычисление коэффициента близости $u_i(V)$ для каждого опасного\критического i -го блока в момент времени V .

6.1. Если $w_i(V) = 0$ $\{i$ -й блок в аварийном состоянии}, то $u_i(V) = 0$. При этом:

— если неисправный или опасный блок — соседний, то $\{u_i(V) = 3\}$;

— если неисправный или опасный блок — через одного, $u_i(V) = 2$;

во всех остальных случаях $u_i(V) = 0$.

6.2. Если $w_i(V) = 2$ $\{i$ -й блок в опасном состоянии}, то $u_i(V) = 3$. При этом:

— если неисправный или опасный блок — соседний, то $\{u_i(V) = 2\}$;

— если неисправный или опасный блок — через одного, $u_i(V) = 1$;

во всех остальных случаях $u_i(V) = 0$.

Определение ближайших блоков осуществляется с помощью матрицы C .

7. Вычисление приращения МО:

$$M_i(V) = \sigma_i w_i(V) \cdot u_i(V) \cdot m_i(V) \cdot \mu_i(V).$$

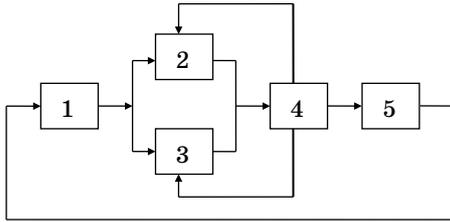
8. Вычисление математического ожидания $m_i(V)$ состояния после учета связей в момент времени V :

если $m_i(V) < -d_i$ или $m_i(V) > d_i$, то $m_i(V) = m_i(0)$, иначе

$$m_i(V) = m_i(V) + M_i(V).$$

9. Вычисление вероятности отказа $P_i(V)$ для каждого i -го блока.

9.1. Если $w_i(V) = 0$ и $k_i = 0$, то $P_i(V) = 1$.



■ Рис. 2. Структурная схема системы

9.2. Если $w_i(V)=0$ и $k_i=1$, то $P_i(V)=p_i(V)=0,004$ и $V_i=V$.

9.3. Если $w_i(V) \neq 0$ и $k_i=1$ и $m_i(V) < -d_i$ или $m_i(V) > d_i$, то $V_i=V$, $P_i(V)=p_i(V)=0,004$, иначе $P_i(V)=\Phi((-b-m_i(V))/\sigma_i)-\Phi((b-m_i(V))/\sigma_i)$.

Определение значения функции Φ производится по таблице [7].

10. Вычисление вероятности отказа элементов декартова произведения вектора p отказов блоков системы:

$$f_{ij}(T) = P\{p_i(T)p_j(T)=1\} = p_i(T)p_j(T).$$

11. Вычисление вероятности отказа системы:

$$P(V) = (-1)^0 \sum_i (f_i(T)) + (-1)^1 \sum_{ij} (f_i(T)f_j(T)) + (-1)^2 \sum_{ijk} (f_i(T)f_j(T)f_k(T)) + \dots + \prod_i (f_i(T))$$

и строим график $P(V)$.

12. Если $P(V)=1$, то останов, иначе переход к шагу 13.

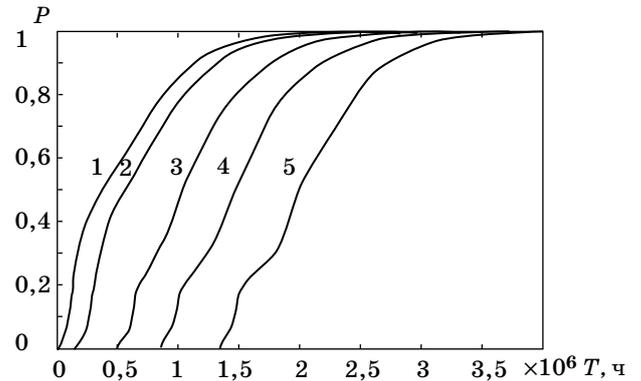
13. Если $V \geq T$, то останов, иначе $V=V+\Delta$ и переход к шагу 4.

В качестве примера рассмотрим, как изменяется во времени вероятность отказа системы, структура которой имеет вид, показанный на рис. 2. Пусть $N^1=N^{11}=5$, $P_{60}=0,996$, $m_{i0}=0$, $b_i=0,15$, $t_{01}=20\,000$ ч, $t_{02}=t_{03}=15\,000$ ч, $t_{04}=25\,000$ ч и $t_{05}=27\,000$ ч, $c_i=\sigma_i$.

Каждый блок 1–5 системы, между которыми строится таблица связей, состоит из основного и

■ Связи между блоками системы

Опасный блок i	Блоки j , связанные с опасным напрямую	Блоки k , связанные с опасным через один
1	2, 3	4
2	4	5
3	4	5
4	2, 3, 5	1
5	1	2, 3



■ Рис. 3. Зависимость вероятности отказа системы от времени работы:
1 — без замены; 2 — замена при $d=1,5$;
3 — замена при $d=2$;
4 — замена при $d=2,5$;
5 — замена при $d=3\sigma$

резервного, подключаемого при достижении критического состояния основного блока.

Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка, резервирование блоков повышает время наработки на отказ системы тем больше, чем больше будет граничное значение параметров d , при превышении которого следует производить замену блоков на резервные. Однако одновременно уменьшается резерв времени на замену без последствий (аварий). Поэтому целесообразно проводить прогноз путем моделирования при различных значениях параметров d , а время замены оборудования выбирать в зависимости от требуемых затрат времени на ремонт тех или иных блоков и (или) от возможных последствий для системы в целом из-за их отказов.

Методы принятия решения при управлении живучестью

Рассмотрим достоинства и недостатки возможных методов принятия решения при управлении живучестью сложной системы с горячим резервированием.

1. Пусть необходимо контролировать параметры блоков x_i и при наступлении ситуации, когда $x_i \geq b_i$, вместо данного блока включать аналогичный резервный.

Достоинство: простота.

Недостатки: простой (отказ) системы на время переключения и высокая вероятность ложных срабатываний при случайных кратковременных выбросах параметров.

2. Пусть необходимо контролировать параметры блоков x_i , при этом вычисляют МО m_i и при

наступлении ситуации, когда $m_i \geq b_i$, вместо данного блока включают аналогичный резервный.

Достоинство: меньше вероятность ложных срабатываний.

Недостатки: простой (отказ) системы на время переключения и выше сложность системы, чем в первом случае.

3. Пусть необходимо контролировать параметры блоков x_i , при этом вычисляют текущее значение МО m_i , моделируют изменение во времени t МО $m_i(t)$ без учета связей между блоками системы, определяют по результатам моделирования возможное время T_a наступления ситуации, когда $m_i \geq b_i$, и в момент времени $T_p = k_p T_a$, где $k_p < 1$, вместо данного блока включают аналогичный резервный и производят устранение поломок и частичных отказов. Конкретное значение величины k_p определяют операторы, исходя из опыта эксплуатации аналогичных систем.

Достоинства: меньше вероятность ложных срабатываний, малая вероятность простоев (отказов) системы на время переключения.

Недостатки: низкая точность прогноза наступления момента времени $T_p = k_p T_a$, выше сложность системы, чем во втором случае.

4. Пусть необходимо контролировать параметры блоков x_i , при этом вычисляют текущее значение МО m_i , моделируют изменение во времени t МО $m_i(t)$ с учетом связей между блоками системы, определяют по результатам моделирования возможное время T_a наступления ситуации, когда $m_i \geq b_i$, и в момент времени $T_p = k_p T_a$, где $k_p < 1$, вместо данного блока включают аналогичный резервный и производят устранение поломок и частичных отказов.

Достоинства: меньше вероятность ложных срабатываний, чем в третьем случае, меньше вероятность простоев (отказов) системы на время переключения, чем в третьем случае, выше точность прогноза наступления момента времени $T_p = k_p T_a$.

Недостатки: выше сложность системы, чем в третьем случае, приближенный учет влияния параметров одних блоков на другие.

Заключение

Предложенный метод моделирования позволяет повысить точность прогноза времени наступления критической ситуации по каждому блоку системы и тем самым повысить живучесть системы за счет своевременного включения механизма резервирования. При этом можно получить резерв времени на проведение необходимых технических мероприятий по подключению резервных блоков и устранению поломок и частичных отказов.

Литература

1. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Управление и нейронные сети. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 312 с.
2. Городецкий А. Основы теории интеллектуальных систем управления. – СПб.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 313 с.
3. Городецкий А. Е., Дубаренко В. В. Комбинаторный метод вычисления вероятности сложных логических функций // ЖВМ и МФ. 1999. Т. 39. № 7. С. 1246–1249.
4. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
5. Городецкий А. Е., Кулик Б. А. Вычисление вероятностей логических функций при логико-вероятностном моделировании сложных систем // Математическое моделирование. 2013. № 2. С. 125–136.
6. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 336 с.
7. Червоный А. А., Лукьященко В. И., Котин Л. В. Надежность сложных систем. – М.: Машиностроение, 1976. – 211 с.

УДК 629.1.04

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ МЕНЕДЖМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ

Г. И. Коршунов,
доктор техн. наук, профессор
Ли Шунь Минь,
аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложены технические средства, модели и методы для уменьшения времени погрузки/выгрузки нефти и сокращения производственного цикла транспортировки нефти морскими танкерами. Рассмотрены особенности грузовых систем, предложено использование быстроразъемного соединения с «плавающим шаром». Представлены математические модели процессов загрузки нефти на базе аппроксимации характеристик насоса, а также модель баланса расходов и напоров на основе гидравлических аналогов уравнений Кирхгофа с учетом местных гидравлических сопротивлений. Разработаны система моделирования и алгоритм погрузки нефти, обеспечивающие близкое к оптимальному изменение скорости потока нефти и сокращение времени по критерию Lead Time.

Ключевые слова — время производственного цикла, быстроразъемное устройство, баланс расходов в сети, баланс напоров в сети, метод узловых напоров, моделирование процесса погрузки танкера.

Введение

Незначительные запасы нефти на суше существенно ограничивают возможности развития экономики, в связи с чем интенсивно осваиваются нефтяные месторождения на шельфе. Вопросы погрузки нефти в открытом море имеют свою специфику, в том числе на их решение определенное влияние оказывают природно-климатические условия и, прежде всего, волны и ветер, которые повышают риск проведения операций погрузки нефти в море. Поэтому актуальны вопросы повышения эффективности использования технологического и транспортного оборудования, сокращения времени погрузки, минимизации вмешательства человека в технологические процессы, что требует специальных проектных и конструктивных решений, приносящих экономический эффект.

Прием груза на борт и подача его в трюмы осуществляются насосными станциями закрытым способом с помощью гибких шлангов, которые крепят к приемным патрубкам посредством бы-

строразъемных соединений. Уменьшение времени погрузки/выгрузки нефти на основе новых методов и средств является актуальным для сокращения времени производственного цикла морской транспортировки нефти.

В статье рассмотрены анализ особенностей схемы грузовой системы, разработка математической модели погрузки нефти в танкер в условиях открытого моря и программного обеспечения системы моделирования, технико-экономический анализ системы «отгрузочные устройства — танкер» при обязательном рассмотрении альтернативных решений, обеспечивающих регулярную и безопасную отгрузку нефти с платформ.

Целью работы является сокращение времени производственного цикла морской транспортировки нефти на основе моделирования процессов погрузки/выгрузки нефти в танкер в условиях открытого моря (с морских нефтесборных платформ и морских отгрузочных терминалов), исследования и выбора вариантов систем.

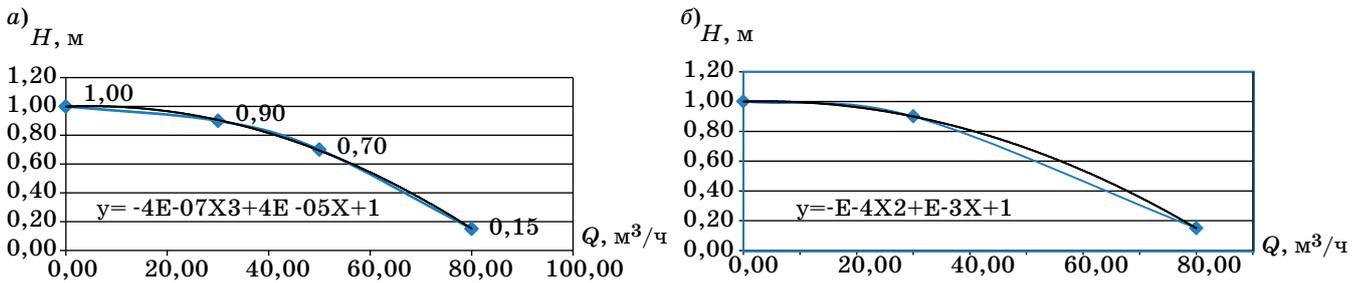


Рис. 2. Кубический (а) и квадратичный (б) полином

ры в узлах i ; $H_{i,j}$ — статические и (или) действующие напоры насосов в участке ij ; $h_{i,j}$ — потери напора на участке ij .

Приведем описание решения системы уравнений.

1. Пассивный участок:

$$dP_{i,j} = P_i - P_j + (Z_i - Z_j)\rho;$$

$$Q_{ij} = C_{ij} \sqrt{|\Delta P_{ij}| \text{sign}(\Delta P_{ij})};$$

$$|\sum Q_{ij}| < \varepsilon,$$

где Q — расход на участке ij ; C — коэффициент шероховатости; d — относительная плотность.

2. Активный участок — вход в насос:

$A_k(1...4)$ — коэффициент кубической параболы (рис. 2, а), аппроксимирующей характеристику насоса $H(Q)$;

$X(1...4)$ — переменная полинома, служащего для нахождения расхода на участках.

Для аппроксимации по трем точкам график имеет вид, представленный на рис. 2, б.

Характеристика насоса задается обычно в виде графиков. Для машинного представления график разбивается на участки по точкам, и данные в компьютер вводятся в виде таблицы. Как правило, достаточно трех точек (см. рис. 2, б), но если требуется большая точность, выбирают четыре точки (см. рис. 2, а). Затем полученный полином используется для дальнейших расчетов режимов работы грузовой системы. Полиномиальные тренды можно построить в Excel и получить соответствующие уравнения. Для получения уравнения надо найти коэффициенты K_i при неизвестных и значение свободного члена K_0 .

Система уравнений примет вид

$$H_1 = K_1 Q_{13} + K_2 Q_{12} + K_3 Q_1 + K_0$$

$$H_2 = K_1 Q_{23} + K_2 Q_{22} + K_3 Q_2 + K_0$$

$$H_3 = K_1 Q_{33} + K_2 Q_{32} + K_3 Q_3 + K_0$$

$$H_4 = K_1 Q_{43} + K_2 Q_{42} + K_3 Q_4 + K_0$$

Здесь нижние индексы соответствуют выбранным точкам.

Решение системы производится одним из способов, например, заменой переменных. В этом случае мы можем сразу найти значение свободного члена (точка 1 при $Q_1=0$). В результате получим те же коэффициенты, что и в Excel.

Для построения полной математической модели требуется рассчитать нижеследующие параметры:

— объем жидкости в цистерне i : $dv_i / dt \neq Q_{ij}$, где ij — участок системы, примыкающий к цистерне;

— уровень жидкости в цистерне: $H_{i,j} = f(V_j)$;

— давление в узле, примыкающем к цистерне:

$$P_i = P_{vi} + \rho H_i.$$

Рассчитать давление воздуха в цистерне P_B (идеальный газ) можно по формуле

$$\frac{dP_B}{dt} = \frac{1}{V_B} \left(RT \frac{dG_B}{dt} - P_B \frac{dV_B}{dt} \right),$$

где V_B — объем воздуха в цистерне; G_B — масса

воздуха в цистерне; $\frac{dG_B}{dt}$ — расход воздуха из/в

цистерну через систему вентиляции цистерны.

Наличие местных сопротивлений изменяет эту структуру на незначительной части участка. Коэффициент местных сопротивлений существенно превосходит коэффициент трения жидкости о стенки трубы. Поэтому по аналогии с законом Ома для электрической цепи потеря напора на участке может быть представлена в виде $h = QS$, где Q — расход на участке за единицу времени; S — приведенное (к данному расходу) гидравлическое сопротивление участка.

С учетом формулы Дарси — Вейсбаха [6] потеря напора на участке вычисляется по формуле

$$h = \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta \right) \frac{v^2}{2g} \rho \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2)$$

Здесь l — длина участка, м; d — внутренний диаметр, м; ζ — суммарный коэффициент местных сопротивлений на участке; v — скорость те-

чения, m/c ; $g=9,81$ м/с²; ρ — плотность нефти, кг/м³; $\lambda=f(\text{Re}, \epsilon)$ — коэффициент сопротивления трения нефти о стенки трубы, где Re — критерий

Рейнольдса, $\text{Re} = \frac{vd}{\nu}$, ν — кинематическая вязкость нефти, м²/с; $\epsilon = \frac{k}{d}$ — относительная шеро-

ховатость стенки трубы, k — абсолютная шероховатость стенки трубы, м.

Суммарный коэффициент местных сопротивлений на участке $\zeta = \sum_{i=1}^n \xi_i$.

Приведем формулу (2) к виду

$$h = \left(\frac{\lambda l}{d} + \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \frac{V^2}{2g} + (I_{\text{к}} - I_{\text{н}}),$$

где $I_{\text{н}}, I_{\text{к}}$ — соответственно высота начала и конца участка относительно принятого уровня.

Скорость потока может быть выражена через расход Q , поэтому формулу (2) можно привести к виду

$$h = \left[\left(\frac{\lambda e}{d} + \sum_{i=1}^n \xi_i \right) \frac{8Q}{\pi^2 d^4 g} + \frac{(I_{\text{к}} + I_{\text{н}})}{Q} \right] Q.$$

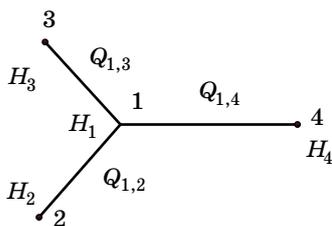
Рассматривая выражение в квадратных скобках как приведенное гидравлическое сопротивление участка S , можно найти и обратную ему величину — гидравлическую проводимость участка $P=1/S=Q/h$, откуда

$$Q = Ph. \quad (3)$$

В соответствии с условием неразрывности потока алгебраическая сумма расходов в любом узле системы равна нулю. Поэтому уравнение баланса расходов для узла 1 (рис. 3) будет иметь вид $Q_{1,2} + Q_{1,3} - Q_{1,4} = 0$.

Подставив в него соответствующие выражения из (3), получим потери напора на соответствующих участках:

$$P_{1,2} h_{1,2} + P_{1,3} h_{1,3} - P_{1,4} h_{1,4} = 0. \quad (4)$$



■ Рис. 3. Схема гидравлического узла

При установившемся режиме течения для каждого участка выполняется условие

$$h_{i,j} = H_i - H_j,$$

где H_i, H_j — приведенные напоры в соответствующих узлах.

При наличии на участке нагнетателя с напором $H_{i,j}$ потеря напора будет

$$h_{i,j} = H_i - H_j - d H_{i,j}, \quad (5)$$

где $d = \begin{cases} +I, & \text{если нагнетание происходит} \\ & \text{в сторону узла } i \\ -I, & \text{если в противоположную сторону} \end{cases}$.

Преобразовав уравнение (4) с учетом выражения (5), получим

$$P_{1,2} (H_1 H_2 - d H_{1,2}) + P_{1,3} (H_1 H_3 - d H_{1,3}) - P_{1,4} (H_1 H_4 - d H_{1,4}) = 0. \quad (6)$$

После преобразований уравнение (6) представим в виде

$$(P_{1,2} + P_{1,3} + P_{1,4}) H_1 - P_{1,2} H_2 - P_{1,3} H_3 - P_{1,4} H_4 = P_{1,2} d H_{1,2} + P_{1,3} d H_{1,3} + P_{1,4} d H_{1,4}.$$

Выражение $(P_{1,2} + P_{1,3} + P_{1,4})$ условно назовем гидравлической проводимостью узла $I - P_{1,i}$, а выражение в правой части будем рассматривать как приведенную производительность (подачу) нагнетателей, действующих на участках, прилегающих к узлу I , которую обозначим G_i .

При $n+1$ узлах в гидравлической сети система уравнений балансов расходов и напоров с учетом принятых обозначений (1) имеет вид

$$\begin{cases} P_{1,1} H_1 - P_{1,2} H_2 \dots - P_{1,n} H_n - P_{1,n+1} H_{n+1} = G_1 \\ -P_{2,1} H_1 - P_{2,2} H_2 \dots - P_{2,n} H_n - P_{2,n+1} H_{n+1} = G_2 \\ \dots \dots \dots \\ -P_{n,1} H_1 - P_{n,2} H_2 \dots - P_{n,n} H_n - P_{n,n+1} H_{n+1} = G_n \\ -P_{n+1,1} H_1 - P_{n+1,2} H_2 \dots - P_{n+1,n} H_n - \\ - P_{n+1,n+1} H_{n+1} = G_{n+1} \end{cases}$$

В случае замкнутой гидравлической сети эта система имеет бесконечное число решений относительно узлов. Поэтому при расчетах напор в одном из узлов должен быть задан (например, равным нулю). Для незамкнутых систем таким узлом может считаться внешняя среда, на которую замыкаются все начальные и конечные узлы. При программной реализации этого метода была предусмотрена возможность задания такого узла под номером «0», в противном случае выбор узла производится программой.

С учетом сказанного система уравнений баланса расходов и напоров в гидравлической сети в матричной форме будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & -P_{1,2} & -P_{1,3} & \dots & -P_{1,n} \\ -P_{2,1} & -P_{2,2} & -P_{2,3} & \dots & -P_{2,n} \\ & & \dots & & \\ & & & \dots & \\ -P_{n,1} & -P_{n,2} & -P_{n,3} & \dots & -P_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \dots \\ \dots \\ H_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \dots \\ \dots \\ G_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

Поскольку при отсутствии непосредственной связи между узлами сети $P_{ij}=0$, матрица P , по существу, определяет топологию этой сети и интенсивность связей между узлами. Особенностью матрицы проводимости является также и то, что она является симметричной относительно главной диагонали; элементы главной диагонали, в отличие от других элементов, положительны и по модулю больше любого другого элемента столбца или строки. Эти особенности имеют принципиальное значение для обеспечения сходимости при решении системы уравнений (6). Получение расходов на участках системы производится многократным решением линейной системы уравнений (6) до достижения необходимой точности по расходам на участках. Существуют различные реализации метода узловых давлений.

Для БРУ с диаметром 600 мм потери на запорном устройстве определены путем пересчета при принятых следующих исходных данных [7]: фактический диаметр $D=485$ мм; усредненная скорость потока нефти $V=9,60$ м/с; потеря напора $h=0,78$ бар= $78\,000$ кг/м²; плотность нефти $\rho=920$ кг/м³.

Для расчета ζ преобразуем формулу (2) к виду

$$\lambda = h \frac{2g}{v^2 \rho}$$

Подставив вышеприведенные данные, получим

$$\zeta_3 = 7800 \cdot \frac{2 \cdot 9,81}{9,6^2 \cdot 920} = 1,81.$$

Сумма коэффициентов местных сопротивлений БРУ составит

$$\zeta_c = \zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3 = 2 + 0,38 + 1,81 = 4,19,$$

а общие потери напора на БРУ с физическим диаметром 585 мм (условный — 600 мм) при расходе 12 000 м³/ч при скорости потока в БРУ

$$V = \frac{12\,000 \cdot 4}{3600 \cdot \pi \cdot 0,585^2} = 12,4 \text{ м/с}$$

составят $h = \zeta_c \frac{v^2}{2g}$

или, после подстановки,



■ Рис. 4. Укрупненная блок-схема программно-информационного обеспечения системы моделирования процесса погрузки танкера

$$h_{\text{БРУ}} = 4,19 \cdot \frac{12,4^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 920 = 29\,881 \text{ кг/м}^2 \approx 3 \text{ бар.} \quad (8)$$

С учетом номинального расхода нефти $Q=12\,000$ м³/ч и соответствующего значения $h_{\text{БРУ}}=29\,881$ кг/м² (8) получим выражение для расчета стабилизирующей величины напора на БРУ:

$$H_{\text{БРУ}} = 29\,881 (1 - Q_{\text{БРУ}}^2 / 12\,000^2) = 29\,881 (1 - Q_{\text{БРУ}}^2 / 144 \cdot 10^6) [\text{кг/м}^2],$$

где $Q_{\text{БРУ}}$ — изменение потерь объема в БРУ.

Суммарный действующий напор на приемном патрубке грузовой системы

$$H = H_{\text{в}} + H_{\text{БРУ}} = (21\,840 - 0,11466 \cdot \sum V_i) + 29\,881 (1 - Q_{\text{БРУ}}^2 / 144 \cdot 10^6) [\text{кг/м}^2],$$

где $H_{\text{в}}$ — действующий напор: $H_{\text{в}} = h\rho = 21\,840 - 0,11466 \cdot \sum V_i$ [кг/м²].

В общем случае задача выбора диаметров труб относится к задачам оптимизационного класса, связанным с выбором стратегии управления, в данном случае — с последовательностью открытия и закрытия задвижек на сливных патрубках в танках [8]. Приняв стратегию одновременного заполнения всех танков нефтью, выбор диаметров труб на участках можно осуществить путем многовариантных расчетов, используя соответствующую расчетную модель. Такая стратегия обеспечивает минимальное время погрузки танкера при ограничениях на скорость движения нефти в трубах и минимизацию затрат на трубопровод. Укрупненная структура системы моделирования процесса погрузки танкера показана на рис. 4.

Разработанная форма экрана обеспечивает ввод исходных данных для расчета, отображение

принципиальной схемы системы, отображение процесса заполнения отдельных танков, отображение относительной величины расхода в системе во времени, доступ к файлам исходных данных и результатов, управление процессом расчета.

Обобщенная блок-схема алгоритма моделирования процесса приема нефти представлена на рис. 5. Соответствующая программа предназначена для моделирования процесса погрузки нефти из хранилищ платформы на нефтеналивное судно с целью определить длительность опера-

ций погрузки и основные параметры течения нефти; уточнить диаметры труб грузовой системы танкера по результатам расчетов вариантов грузовой системы.

Программа разработана на ПЭВМ типа IBM PC в среде MS Visual Basic 6.0. Программа работает в среде операционных систем Windows XP. Предназначена для вывода на экран результатов моделирования с заданным шагом вывода расхода в системе, текущих объемов жидкости в цистернах. Все содержимое файла результатов или его фрагмент могут быть скопированы в буфер обмена Windows для последующего вывода на печать или вставки в другой документ.

Результаты расчетов показывают, что выбранные диаметры для участков грузовой системы обеспечивают почти одновременное заполнение танков за время, равное 6 ч [9].

Оценка снижения затрат на транспортировку нефти при внедрении технологических инноваций

Для оценки рыночной стоимости танкера дедвейтом 60 тыс. т на 2012 г. воспользуемся данными, приведенными на сайте [9] для танкеров дедвейтом 300, 250, 110 тыс. т.

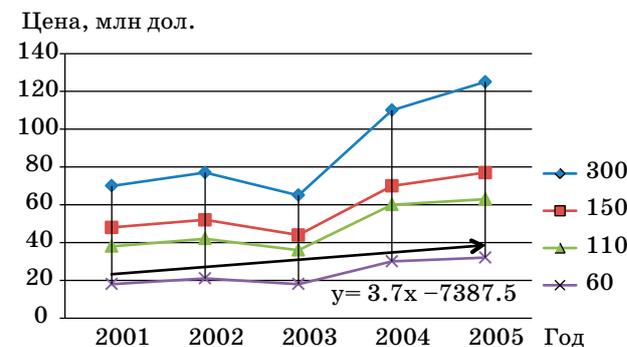
Экстраполируя эти данные для танкера дедвейтом 60 тыс. т, получим в графическом виде зависимость цены танкеров от дедвейта (рис. 6).

Аппроксимируя эту зависимость для танкера дедвейтом 60 тыс. т по линейному закону, получим уравнение $Y = 3,65x - 7387$, где x — год, для которого производится расчет, и получим $Y = 60,864$ млн дол.

Необходимое количество танкеров для транспортировки всего объема добываемой нефти (порядка 100 тыс. т/сут) на морских месторождениях в море определяется в соответствии со следующей методикой.



■ Рис. 5. Обобщенная блок-схема алгоритма расчета погрузки нефти



■ Рис. 6. Графики изменения цены танкеров в зависимости от дедвейта

1. Время, затрачиваемое традиционно на перевозку нефти одним танкером за 1 круговой рейс:

$$T = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_{\text{всп}}) = \\ = (20 + 12 + 25 + 12 + 10) \cdot 1,3 = \\ = 102,7 \text{ ч} \approx 4,3 \text{ сут},$$

где t_1, t_2, t_3, t_4 — время порожнего рейса, погрузки, рейса с грузом, разгрузки соответственно; $t_{\text{всп}}$ — вспомогательное время; 1,3 — коэффициент, учитывающий ремонтные работы, форсмажорные обстоятельства и т. д.

2. Время, затрачиваемое на перевозку нефти одним танкером за 1 круговой рейс при сокращенном времени погрузки и разгрузки:

$$T = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_{\text{всп}}) = \\ = (20 + 6 + 25 + 6 + 10) \cdot 1,3 = 87,1 \approx 3,6 \text{ сут}.$$

3. Принимаем, что годовой дебит нефти на месторождениях

$$D_{\text{н}} = 100 \cdot 365 = 36,5 \text{ млн т.}$$

4. Требуемое количество перевозок нефти танкерами грузоместимостью 60 тыс. т:

$$N_{\text{н}} = D_{\text{н}} : D_{\text{т}} = 36500 : 60 = 608 \text{ танкеров} \cdot \text{рейс}.$$

5. Количество рейсов, совершаемых одним традиционным танкером в течение года:

$$N_{\text{т.т}} = 365 : 4,3 = 84,9 \approx 85 \text{ рейсов}.$$

6. Количество рейсов, совершаемых одним танкером с сокращенным временем погрузки и в течение года:

$$N_{\text{т.год}} = 365 : 3,6 = 101,38 \approx 101 \text{ рейс}.$$

7. Количество традиционных танкеров, требуемых для транспортировки нефти:

$$K_{\text{т}} = N_{\text{н}} : N_{\text{т.т}} = 608 : 85 = 7,15.$$

8. Количество модернизированных танкеров, требуемых для транспортировки нефти:

$$K_{\text{у}} = N_{\text{н}} : N_{\text{т.год}} = 608 : 101 = 6,02.$$

9. Округляя полученное количество танкеров до целого числа, получим, соответственно, $K_{\text{т}} = 8$ и $K_{\text{у}} = 7$ танкеров.

Таким образом, в течение одного года для перевозки 36,5 млн т нефти количество требуемых танкеров может быть сокращено на единицу. В денежном выражении, учитывая, что цена одного танкера указанного дедвейта равна 60,864 млн дол., это будет равно экономии от использования 7 танкеров с ускоренной погрузкой.

Заключение

Предложенные модели и методы обосновывают возможность уменьшения затрат на транспортировку нефти от месторождений за счет сокращения времени погрузки нефти на основе технологических инноваций.

В БРУ использован «плавающий шар», программное управление которым обеспечивает близкое к оптимальному изменение скорости потока загружаемой нефти.

Разработанная программа позволяет моделировать динамические процессы погрузки нефти из хранилищ платформы на нефтеналивное судно.

Литература

1. Борисов Р. В., Макаров В. Г. Морские инженерные сооружения: учебник. — СПб.: Судостроение, 2003. — 533 с.
2. Бухарицин П. И., Беззубиков Л. Г. Грузовая система наливного судна // Проблемы и перспективы современной науки. Томск, 2011. Т. 3. № 1. С. 103–109.
3. Кутыркин В. А., Постников В. И. Специальные системы нефтеналивных судов: справочник. — М.: Транспорт, 1983. — 192 с.
4. Arvind Bhardwaj, Ajay Gupta, Arun Kanda. Drum-Buffer-Rope: The Technique to Plan and Control the Production Using Theory of Constraints. — Las Cruces, USA: WASET, 2010. Is. 0045. — 120 p.
5. Алиев И. И. Электротехнический справочник. Изд. 5-е, стер. — М.: РадиоСофт, 2010. — 384 с.
6. Путилов В. Я. и др. Методические указания по расчету и рекомендации по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС: РД 153-34.1-27.512; введ. 2002-01-01 / Московский энергетический институт; УралОРГРЭС. — М., 2002. — 36 с.
7. Подволоцкий Н. М. Расчеты основных параметров грузовых насосных установок танкеров/ГМА им. Макарова. — СПб., 2009. — 48 с.
8. Правила морской перевозки нефти и нефтепродуктов наливом на танкерах: РД 31.11.81.36-81; утв. Министерством морского флота СССР / Мортехинформреклама. — М., 1985. — 85 с.
9. Судостроение, машиностроение за рубежом. Т. III–IV: Строительство и ремонт гражданских морских и речных судов, станкостроение, тяжелое машиностроение: справочники ПОЛПРЕД. — М., 2008. http://polpred.com/free/sector/204_demo.pdf (дата обращения: 15.10.2013).

УДК 330.3

МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. М. Колесников,

доктор экон. наук, профессор

А. Н. Сторощук,

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается проблема разработки и применения экономического механизма управления устойчивостью производственного предприятия, в частности, теоретические вопросы совершенствования методики оценки угроз устойчивому развитию промышленных предприятий на ранней стадии их возникновения на основе оптимального распределения ресурсов при реализации программ адаптивного управления. Для анализа устойчивости производственного предприятия выдвигается целесообразность выявления сети проблемных ситуаций, которые и отражают основные угрозы его устойчивому развитию.

Ключевые слова — устойчивость предприятия, программа повышения устойчивости, оптимальное распределение ограниченных ресурсов, индекс устойчивости, метод динамического программирования.

Проблема развития теоретических основ и практических предложений по комплексному мониторингу угроз устойчивому развитию промышленных предприятий в российских условиях включает определение и выявление направлений неустойчивости для предприятия, разработку системы показателей для качественной и количественной оценки неустойчивости, выработку программ преодоления неустойчивости по направлениям с оценкой вклада каждой из них в снижение степени неустойчивости и повышение эффективности предприятия при имеющихся ресурсных и иных ограничениях. В целом данную научную проблему можно определить как разработку и применение экономического механизма управления устойчивостью производственного предприятия.

Необходимость развития теоретических основ и практических предложений по организации комплексного мониторинга угроз устойчивому развитию промышленных предприятий в российских условиях определяется рядом значимых факторов как общеэкономического масштаба, так и микроуровня [1]. Во-первых, развитие мирового экономического кризиса в условиях глобализации экономики и интернационализации промышленности в значительной степени мультиплицирует

данные угрозы. Во-вторых, эффективность управления (в том числе антикризисного) любым предприятием в значительной мере зависит от качества информационного обеспечения. В-третьих, меры антикризисного управления для предприятия должны отвечать принятым критериям экономической эффективности и быть реализуемыми в условиях имеющихся ресурсных и иных ограничений в деятельности конкретного предприятия. В-четвертых, необходимо при оценке и выработке методов управления устойчивостью предприятия преодолеть укоренившееся узкое понимание устойчивости только с финансовой стороны. Такое представление ограничивает возможности антикризисного управления на предприятии и снижает его эффективность, однако оно имеет широкое распространение на практике вследствие наличия системы показателей и методов оценки эффективности, тогда как применительно к устойчивости как таковой (по нашему мнению, ее еще можно характеризовать как экономическую устойчивость) общепринятых стандартов понимания проблемы, ее определения в принятой системе координат оценок эффективности деятельности предприятия нет [2].

Для принятия рациональных управленческих решений руководству промышленных пред-

приятый необходим систематический анализ и максимально точное выявление спектра и значимости потенциальных угроз, а осуществить это можно, только регулярно отслеживая процессы, происходящие во внешней и внутренней среде предприятия. Главной целью комплексного мониторинга угроз устойчивому развитию промышленных предприятий является удовлетворение потребности различных иерархических уровней управления в объективной, конкретной и интегрированной информации для принятия решений, направленных на повышение эффективности и обеспечение социально-экономической устойчивости [3].

Для анализа устойчивости производственного предприятия целесообразно выявить сеть проблемных ситуаций, которые и отражают основные угрозы устойчивому развитию. Введем понятие «направления» неустойчивости, которые в то же время являются направлениями целенаправленных действий по повышению устойчивости предприятия. Для анализа примера выделим из многих возможных направлений повышения устойчивости два конкретных:

1) соответствие наличия высококвалифицированной рабочей силы на рынке труда потребности предприятия для роста производства (больше/меньше);

2) соответствие возможности предприятия быстро наращивать выпуск продукции, требуемой для достижения необходимых темпов роста предприятия.

В качестве критерия эффективности, успешности деятельности предприятия по повышению устойчивости предлагается следующий показатель, тенденция изменения которого характеризует совокупный индекс изменения устойчивости:

$$\prod_{i=1}^n \frac{\Pi_i}{\Phi_i} \rightarrow \min,$$

где Π_i — потребность или плановое задание результатов деятельности по i -му направлению повышения /поддержания устойчивости предприятия (плановое или требуемое значение); Φ_i — фактически достигнутый результат изменения устойчивости по i -му направлению.

Логика использования критерия предлагаемого типа следующая: чем меньше значение Φ , тем больше численная величина критерия, а чем величина критерия меньше, тем лучше, успешнее деятельность по повышению устойчивости.

Фактическое достижение результатов повышения устойчивости зависит от количества имеющихся ресурсов, которые могут быть направлены на указанные цели. В рамках каждого определенного нами направления повышения устойчи-

вости выделим программы повышения устойчивости, для реализации которых необходимо затратить определенное, запланированное количество финансовых или иных ограниченных ресурсов. Будем считать, что расход ресурсов для успешной реализации программ повышения устойчивости необходим полностью в запланированном объеме для каждой программы, в противном случае программа не может быть выполнена. В рассматриваемой нами задаче оптимального управления программами повышения устойчивости расход ресурсов — дискретная переменная величина, принимающая ряд заранее определенных целочисленных значений, являющихся плановыми значениями расхода ограниченных ресурсов для реализации программы.

При определении фактически достигнутого результата от реализации программ повышения устойчивости можно рассматривать два альтернативных подхода, характеризующихся следующими правилами:

- 1) при $\Phi_i \leq \Pi_i$ $\Delta\Phi_i = \Pi_i - \Phi_i$,
при $\Phi_i > \Pi_i$ $\Delta\Phi_i = 0$;
- 2) при $\Phi_i \leq \Pi_i$ $\Delta\Phi_i = \Pi_i - \Phi_i$,
при $\Phi_i > \Pi_i$ $\Delta\Phi_i = \Phi_i - \Pi_{от i}$.

В первом случае часть ограниченных ресурсов расходуется бесполезно, так как результат — фактическое повышение устойчивости — не достигается.

Во втором случае превышение фактического результата над плановым связано с определенными потерями, они могут быть количественно определены в форме недополученного эффекта от альтернативного использования ограниченных ресурсов, фактически использованных для достижения устойчивости, превышающей плановые значения.

Общая формулировка задачи оптимального распределения ресурсов между программами повышения устойчивости

$$\prod_{i=1}^n \frac{\Pi_i}{\Phi_i(r_j)} \rightarrow \min$$

при следующих ограничениях:

$$\Phi_i(r_j) = \sum_{j=1}^m \Phi_{ij}(r_j);$$

$$\Phi_{ij}(r_j) = \Phi_{0i} + \sum_{j=1}^m \Delta\Phi_{ij}(r_j);$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij} = R,$$

где i — направление повышения устойчивости; j — программа повышения устойчивости по на-

правлению; r_{ij} — требуемый расход ограниченных ресурсов на реализацию программы; R — имеющийся на предприятии лимит ограниченных ресурсов на реализацию программ повышения устойчивости; $\Delta\Phi_{ij}(r_j)$ — достижимое повышение устойчивости по i -му направлению при реализации j -й программы.

Приведенная постановка задачи оптимального распределения лимита ресурсов по программам повышения устойчивости справедлива для первого из названных альтернативных подходов — когда сверхплановый расход ограниченных ресурсов на программу является бесполезным и не приводит к повышению устойчивости.

Другой подход — более реалистичный, когда учитываются потери от бесполезного использования ресурсов ($\Pi_{от}$). Они могут быть определены по следующей формуле:

$$\Pi_{от} = \left(\frac{\text{затраты}}{\text{результаты}} \right) (\text{излишний результат}) \times (\text{норма отдачи альтернативных затрат}).$$

Рассмотрим пример, условия которого приведены в табл. 1. Пусть имеется два направления повышения устойчивости предприятия — 1 и 2, их экономическое содержание раскрыто ранее. Пусть по каждому направлению плановое значение индекса устойчивости $\Pi=1$, фактически достигнутое значение $\Phi=0,9$. Индекс изменения устойчивости для предприятия по каждому направлению равен $\Pi/\Phi=1,11$.

Фактическое значение достигнутой устойчивости в таблице имеет двойственное содержание. С одной стороны, оно выражает снижение фактической устойчивости по отношению к плановому или требуемому уровню. С другой стороны, оно же задает плановое задание для предприятия по повышению устойчивости в разрезе направлений повышения устойчивости и реализуемых программ повышения устойчивости.

Лимит ресурсов $R=10$ ден. ед. для всех программ и направлений.

■ Таблица 1

Направление	Программа	Результат сокращения, отн. ед.	Затраты на программу, ден. ед.
1	1	0,06	6
	2	0,05	4
	Итог	0,11	10
2	1	0,04	4
	2	0,03	3
	3	0,03	3
	Итог	0,1	10

Для определения оптимальной политики повышения устойчивости предприятия, обеспечивающей получение минимального индекса устойчивости, применим принцип «динамического программирования» Р. Беллмана. Использование принципа для рассматриваемого примера показано в табл. 2. Имеющийся ограниченный лимит ресурса распределяется между программами двух рассматриваемых направлений. Имеются альтернативные варианты распределения ограниченного ресурса. Как видно из табл. 1, весь ресурс может быть использован только по направлению 1 (направление 2 остается без ресурса), либо только по направлению 2, возможно также и смешанное распределение ресурса по направлениям 1 и 2.

Если весь лимит ресурса используется по направлению 1, то могут быть реализованы обе программы данного направления, в результате чего интегральный показатель индекса изменения устойчивости по первому направлению будет поднят до 1, по второму направлению, для реализации которого не остается ресурсов, индекс останется без изменения. Общее значение индекса для предприятия в этом случае составит 1,11.

Если весь лимит ресурса направляется на второе направление, а первое направление не получает ничего, то по направлению 2 могут быть реализованы все программы повышения устойчивости, в результате чего интегральный показатель индекса изменения устойчивости по второму направлению будет поднят до 1, а по первому направлению, для реализации которого не остается ресурсов, индекс останется без изменения. Общее значение индекса для предприятия и в этом случае составит 1,11.

Если весь лимит ресурса распределяется между программами первого и второго направления, как показано в табл. 2, то 6 единиц ресурса подается первому направлению и 4 единицы ресурса идет второму направлению. В этом случае по первому направлению может быть реализована только программа 1 и по второму — только программа 1. Как видно из табл. 1 и 2, в этом случае по направлению 1 индекс устойчивости равен $1/0,94=1,0638$, а по второму направлению индекс устойчивости равен $1/0,96=1,04167$. Общее

■ Таблица 2

		Направление 2			
		0	4	7	10
Направление 1	0			1,11	
	6		1,108125		
	10	1,11			

■ Таблица 3

Направление 1	Направление 2			
	0	4	7	10
0				1,11
6		1,108125		
10	1,20768			

значение индекса для предприятия в этом случае составит $1,0638 \times 1,04167 = 1,108125$. Это минимальное значение индекса устойчивости для предприятия из всех альтернативных вариантов распределения ограниченного лимита ресурсов на программы повышения устойчивости. Согласно принятому критерию, это и есть оптимальное решение задачи.

Лимит в размере 10 единиц ресурса должен быть распределен по направлениям следующим образом: 6 единиц — первому направлению, 4 единицы — второму направлению.

В случае если учитываются потери от превышения фактического результата над плановым, их необходимо рассчитать по приведенной ранее формуле. Из табл. 1 видно, что все программы повышения устойчивости предприятия при их успешной реализации обеспечивают требуемое повышение устойчивости до запланированного уровня, кроме программы 2 по первому направлению. При ее реализации фактическое значение индекса устойчивости по первому направлению составит $1,01(0,9 + 0,11)$, что превышает плановое/требуемое значение, равное 1. В этом случае из фактического значения индекса устойчивости по первому направлению необходимо в соответствии с приведенными выше формулами вычесть потери от превышения требуемого уровня устойчивости $\Pi_{от} = 0,0909$. Фактический индекс устойчивости без учета потерь равен 0,9191.

Общий индекс устойчивости для предприятия по направлению 1 для случая, когда все ресурсы

выделяются на данное направление, равен

$$\frac{\Pi}{\Phi} = 1,0880. \text{ При этом индекс устойчивости по на-}$$

правлению 2 не изменяется, так как на его улучшение ресурсов не остается. Совокупный индекс изменения устойчивости для предприятия равен 1,20768.

С учетом потерь от превышения требуемого уровня устойчивости оптимальное распределение ресурсов на программы повышения устойчивости не изменится (табл. 3).

Таким образом, в работе показана возможность совершенствования методики выявления, распознавания, диагностики и оценки угроз устойчивому развитию промышленных предприятий на основе формирования и реализации механизма адаптивного управления, методов количественной оценки, алгоритма и принципов комплексного мониторинга угроз устойчивому развитию промышленных предприятий на основе логико-лингвистической модели, под которой понимается многосвязная структура основных функциональных элементов объекта мониторинга и взаимодействующей с ними внешней среды.

Литература

1. Оводенко А. А., Колесников А. М. Понятие и структура нематериальных активов интеллектуальной собственности // Экономика и управление. 2013. № 4. С. 79–84.
2. Брейли Р., Майерс С. Принципы корпоративных финансов: пер. с англ. – М.: Олимп-Бизнес, 2004. – 1120 с.
3. Стратегия развития предпринимательства в реальном секторе экономики / под ред. д.э.н., профессора Г. Б. Клейнера. – М.: Наука, 2002. – 448 с.

УДК 519.61:511-33

ВЗВЕШЕННАЯ КОНФЕРЕНЦ-МАТРИЦА, ОБОБЩАЮЩАЯ МАТРИЦУ БЕЛЕВИЧА НА 22-м ПОРЯДКЕ

Н. А. Балонин,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Приводится взвешенная конференц-матрица $\mathbf{W}(n, n-2)$, обобщающая матрицу Белевича на порядке 22. Дается оценка максимальности ее определителя на классе квазиортогональных матриц этого порядка сравнением с экстремальной модульно шестиуровневой M -матрицей диагонального типа.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, квазиортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича, взвешенные конференц-матрицы.

В работе [1] определен класс матриц Белевича (конференц-матриц или S -матриц), известный своей ролью в построении матриц Адамара. Это квадратные матрицы порядка n , кратного 2, с нулевой диагональю и остальными элементами $\{1, -1\}$, обладающие свойством $\mathbf{C}^T \mathbf{C} = (n-1)\mathbf{I}$, где \mathbf{I} — единичная матрица.

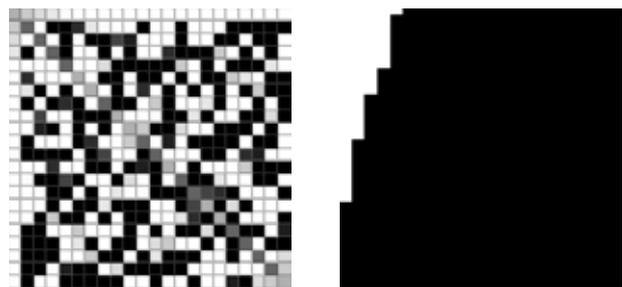
Задача построения конференц-матриц сложна, так, в частности, до сих пор неизвестен вид матриц Белевича 66-го порядка. Данный класс был обобщен так называемыми взвешенными конференц-матрицами $\mathbf{W}(n, n-k)$, отличающимися от матриц Белевича количеством $k \geq 1$ нулевых элементов каждой строки или столбца и более общим уравнением $\mathbf{W}^T \mathbf{W} = (n-k)\mathbf{I}$.

Необходимое условие существования целочисленных матриц обоого типа — разложимость числа $n-k$ на сумму квадратов двух целых чисел [2]. При $k=1$ порядки, для которых не существуют конференц-матрицы, таковы: 22, 34, 58, 70, 78, 94 Определенная надежда в связи с этим возлагается на взвешенные матрицы, поскольку очевидно, что на разрешимость задачи можно влиять, изменяя целочисленный параметр k .

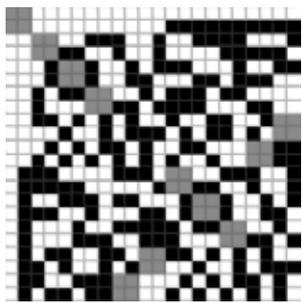
К сожалению, более общие классы матриц изучены хуже. Относительно недавно (в 2003 г.) была опубликована матрица 15-го порядка, обладающая на классе матриц с элементами $\{1, -1\}$ качеством матриц Адамара иметь максимальное значение модуля определителя [3]. Классифика-

ция взвешенных конференц-матриц с элементами $\{0, 1, -1\}$ завершена для случаев $n-k \leq 5$, возможные варианты решения предложены для порядков $n \leq 15$, меньших первого проблемного порядка для матриц Белевича [4, 5].

В связи с этим в работе [6] была предложена аппроксимация несуществующей матрицы Белевича 22-го порядка матрицами с несколькими разрешенными значениями модулей элементов — уровнями [7], меньшими или равными 1. Программный поиск такой M -матрицы [8] позволил выделить три шестиуровневых варианта, из них матрица с самым малым уровнем элементов диагонали уступила по величине определителя итоговой экстремальной версии M_{22} (рис. 1).



■ Рис. 1. Портрет шестиуровневой матрицы M_{22} и гистограмма ее элементов



■ *Рис. 2.* Портрет взвешенной конференц-матрицы матрицы W_{22}

Оригинальный алгоритм [8, 9], использованный для анализа предыдущей проблемы, подтвердил разрешимость задачи поиска матрицы с целочисленными элементами $\{0, 1, -1\}$ ввиду разложимости числа $n-2=20$ на сумму квадратов чисел 2 и 4. Определена матрица $W_{22}=W(n, n-2)$ при $n=22$, обладающая необходимыми структурными признаками взвешенных конференц-матриц, показанная на рис. 2, где элементы 1 и -1 отображены клетками черного и белого цвета, а нулевые элементы — серыми клетками.

После удаления каймы из первых двух строк и столбцов такая матрица блочно-симметрична при делении ее пополам по вертикали и горизонтали. Диагональные блоки совпадают, а внедиагональные равны друг другу с точностью до знака. Нулевые элементы могут быть выстроены в блоки 2×2 вдоль диагонали, отражая идею построения матриц Белевича. Следующий принципиальный и важный вопрос состоит в сравнении определителей матриц, отражающих две тенденции в аппроксимации отсутствующих матриц Белевича матрицами диагонального M_{22} и блочно-диагонального W_{22} типов.

Предположение. На классе квазиортогональных матриц четного порядка, кратного 2, при проблемных его значениях максимальным значением определителя обладают взвешенные конференц-матрицы Белевича.

Предположение можно обосновать тем, что на порядках, равных и больших $n=22$, относительная доля нулевых элементов невелика. Это справедливо даже если необходимое условие разрешимости задачи требует размещения нескольких нулей около диагонали. $\det(W(n, n-k))=(n-k)^{n/2}$ слабо зависит от малых значений параметра k , используемого для согласования условий разрешимости. Так, $\det(W_{22})=204\,800\,000\,000\,000$, а при $k=1$ получим оценку недостижимого значения $350\,277\,500\,542\,221$.

Поскольку M -матрица M_{22} также представляет собой взвешенную ортогональную матрицу, ее определитель зависит от веса $\det(M_{22})=1/m^n$, где m — величина максимального элемента ортогональной матрицы [10]. Для M_{22} величина $m=0,226855\dots$, т. е. $\det(M_{22})=149\,120\,095\,399\,252$ [6]. Отсюда следует, что варьирование уровнями элементов (при попытке сохранить строго диагональную структуру матриц Белевича) менее эффективно, чем переход к блочно-диагональной форме взвешенных матриц.

Стоит отметить, что публикация редких артефактных матриц входит в мировую практику, еще один путь вычисления матриц $W(n, n-2)$ связан с использованием комплементарных последовательностей Голея (Golay) [11].

Литература

1. Belevitch V. Theorem of $2n$ -terminal networks with application to conference telephony // *Electr. Commun.* 1950. Vol. 26. P. 231–244.
2. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара // *Информационно-управляющие системы.* 2013. № 5. С. 2–8.
3. Orrick W. P. The maximal $\{-1, 1\}$ -determinant of order 15 (accepted for publication in *Metrika*). <http://arxiv.org/abs/math.CO/0401179> (дата обращения: 15.08.2013).
4. Koukouvinos C., Seberry J. On weighing matrices // *Utilitas Math.* 1993. Vol. 43. P. 101–127.
5. Harada M., Munemasa A. On the classification of weighing matrices and self-orthogonal codes. 2011. <http://arxiv.org/abs/1011.5382> (дата обращения: 15.08.2013).
6. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. M -матрица 22-го порядка // *Информационно-управляющие системы.* 2011. № 5. С. 87–90.
7. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. О двух способах построения матриц Адамара — Эйлера // *Информационно-управляющие системы.* 2013. № 1. С. 7–10.
8. Балонин Ю. Н., Сергеев М. Б. Алгоритм и программа поиска и исследования M -матриц // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2013. № 3. С. 82–86.
9. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. M -матрицы // *Информационно-управляющие системы.* 2011. № 1. С. 14–21.
10. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. — М.: Наука, 1984. — 160 с.
11. Себбери Дж. Сетевая база взвешенных конференц-матриц. <http://www.uow.edu.au/~jennie/sequences.html> (дата обращения: 15.08.2013).

АВАРЯСКИН
Денис
Петрович



Аспирант межвузовской кафедры космических исследований Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), инженер ЗАО «Самарский научный центр космических технологий».

В 2012 году окончил магистратуру Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет) по специальности «Авиа- и ракетостроение». Является автором десяти научных публикаций.

Область научных интересов — наноспутники, динамика полета, относительное движение.
Эл. адрес: avaryaskind@gmail.ru

БАЛОНИН
Николай
Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 80 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книжки с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети.
Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

БЕЛОКОНОВ
Игорь
Витальевич



Профессор, заведующий межвузовской кафедрой космических исследований Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), генеральный директор ЗАО «Самарский научный центр космических технологий».

В 1973 году окончил Куйбышевский авиационный институт им. академика С. П. Королёва по специальности «Производство летательных аппаратов».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 220 научных публикаций и трех патентов на изобретения.

Область научных интересов — динамика полета, баллистика, навигация в космосе.
Эл. адрес: ibelokonov@mail.ru

ВОЗНЮК
Валерий
Васильевич



Доцент, начальник кафедры комплексов и средств информационной безопасности Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского г. Санкт-Петербург.

В 1987 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Автоматизированная обработка информации».

В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — конфликт в радиочастотном спектре, методы проектирования конфликтно-устойчивых организационно-технических систем, комплексы и средства информационной безопасности.
Эл. адрес: vvbox@rambler.ru

ВОЛХОНСКИЙ
Владимир
Владимирович



Профессор кафедры твердотельной оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 1974 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника».

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 190 научных и учебно-методических публикаций, в том числе 11 монографий.

Область научных интересов — интегрированные системы безопасности, системы охранной сигнализации, контроля доступа, телевизионного наблюдения.
Эл. адрес: volkhonski@mail.ru

ГОРОДЕЦКИЙ
Андрей
Емельянович



Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки и техники.

В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и 70 изобретений.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.
Эл. адрес: gorodetsky@mail23.ipme.ru

**ГУБОЧКИН
Иван
Вадимович**



Доцент кафедры математики и информатики Нижегородского государственного лингвистического университета им. Н. А. Добролюбова.

В 2008 году окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева по специальности «Информационные системы и технологии».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 20 научных публикаций.

Область научных интересов — автоматическое распознавание речи, обработка изображений.
Эл. адрес: jhng@yandex.ru

**ДО
Суан
Чо**



Гражданин Вьетнама.

Аспирант кафедры САПР Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

В 2010 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Область научных интересов — моделирование, системы управления, алгоритмизация.

Эл. адрес: doxuancholeti@yahoo.com

**ЗИНЯКОВ
Владимир
Юрьевич**



Аспирант кафедры систем и технологий управления Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Информатика и вычислительная техника». Область научных интересов — системы автоматизированного управления, обработка изображений.

Эл. адрес: vziniakov@gmail.com

**КАРПОВ
Николай
Вячеславович**



Доцент кафедры прикладной математики и информатики Национального исследовательского университета Высшая школа экономики, г. Нижний Новгород. В 2005 году окончил Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского по специальности «Информационные системы».

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций.

Область научных интересов — распознавание речи, анализ качества речи, информационный поиск.

Эл. адрес: nkarпов@hse.ru

**КОЛЕСНИКОВ
Александр
Михайлович**



Доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и финансов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1971 году окончил Ленинградский финансово-экономический институт им. Н. А. Вознесенского по специальности «Экономист».

В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора экономических наук. Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — инвестиции и инновации в различных отраслях народного хозяйства, совершенствование кредитной политики банков и др.
Эл. адрес: SUAI-dep81@yandex.ru

**КОЛОСКОВ
Максим
Игоревич**



Аспирант кафедры электроники и оптической связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Микросистемная техника».

Является автором трех научных публикаций.

Область научных интересов — лазерные информационные технологии, акустооптика, микро- и нанoeлектромеханические устройства.

Эл. адрес: queetman@mail.com

КОРШУНОВ
Геннадий
Иванович



Профессор кафедры инноватики и управления качеством Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, изобретатель СССР, награжден бронзовой медалью ВДНХ, ветеран труда, действительный член Академии проблем качества. В 1970 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций, в том числе шести монографий и семи авторских свидетельств и патентов. Область научных интересов — метрология, автоматизация приборов и систем и др. Эл. адрес: kgi@pantes.ru

ЛУКИН
Михаил
Андреевич



Аспирант кафедры компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2009 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Прикладная математика и информатика». Является автором 13 научных публикаций. Область научных интересов — верификация программного обеспечения, статические анализаторы кода. Эл. адрес: lukinma@gmail.com

МАЛЫШКИН
Сергей
Леонидович



Аспирант кафедры твердотельной оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Лазерная техника и лазерные технологии». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — технические системы безопасности. Эл. адрес: malyshekin-sl@mail.ru

ЛИ
Шунь
Минь



Гражданин КНР. Аспирант кафедры инноватики и управления качеством Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2011 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного морского технического университета по специальности «Судостроение и океанотехника». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — техническая инноватика, стандартизация и надежность, инженерная графика. Эл. адрес: lsm1986125@163.com

МАЛЫЦЕВ
Георгий
Николаевич



Профессор кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского. В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского. В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций и 26 запатентованных изобретений. Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах и др. Эл. адрес: georgy_maltsev@mail.ru

СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, директор НИИ информационно-управляющих систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 1980 году окончил «ЛЭТИ». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 14 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления, оптико-информационные системы. Эл. адрес: mbse@mail.ru

**СКШИДЛЕВСКИЙ
Антон
Алексеевич**



Доцент кафедры компьютерных образовательных технологий, начальник отдела программно-технического обеспечения центра дистанционного обучения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Информационные системы и технологии». В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 19 научных публикаций. Область научных интересов — теория информационных процессов и систем, моделирование систем и др. Эл. адрес: anton@cde.ifmo.ru

**СТОРОЩУК
Александр
Николаевич**



Аспирант кафедры экономики и финансов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2012 году окончил Балтийскую академию туризма и предпринимательства по специальности «Связи с общественностью». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — экономическая и финансовая устойчивость предприятий, оценка эффективности деятельности предприятий. Эл. адрес: dj-hug0@yandex.ru

**ТАУБИН
Феликс
Александрович**



Профессор кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1968 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства систем управления». В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 80 научных публикаций, девяти патентов и двух изобретений. Область научных интересов — цифровые системы связи, методы помехоустойчивого кодирования, широкополосные системы, беспроводные сети. Эл. адрес: ftaubin@yahoo.com

**СОЛЬНИЦЕВ
Ремир
Иосифович**



Профессор кафедры компьютерного проектирования информационно-измерительных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1956 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Гирскопические приборы и системы стабилизации». В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 300 научных публикаций. Область научных интересов — системы автоматизации проектирования, системы управления, экологические системы. Эл. адрес: remira70@mail.ru

**ТАРАСОВА
Ирина
Леонидовна**



Доцент, старший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург. В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматические системы управления». В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика. Эл. адрес: til@msa2.ipme.ru

**ТУКТАМЫШЕВ
Марат Рустэмович**



Докторант кафедры комплексов и средств информационной безопасности Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург. В 1996 году окончил Военную инженерно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Средства радиоэлектронной борьбы». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 27 научных публикаций. Область научных интересов — методы моделирования конфликта сложных радиотехнических систем, интеллектуальное подавление радиолокационных систем, методы и средства технической защиты информации. Эл. адрес: tmr1973@mail.ru

**ФУРТАТ
Игорь
Борисович**



Ведущий научный сотрудник лаборатории управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, профессор кафедры систем управления и информатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 2005 году окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 65 научных публикаций.

Область научных интересов — адаптивное управление, робастное управление, оптимальное управление и др.

Эл. адрес: cainenash@mail.ru

**ХАНСУВАРОВ
Руслан
Андреевич**



Аспирант, младший научный сотрудник кафедры электроники и оптической связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Физика и техника оптической связи».

Является автором десяти научных публикаций.

Область научных интересов — лазерные информационные технологии, акустооптика, микро- и нано-электромеханические устройства.

Эл. адрес: Ruslan.hansuvarov@gmail.com

**ЧУЙКОВ
Александр
Владимирович**



Аспирант кафедры информационных систем и управления Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2007 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Является автором 15 научных публикаций.

Область научных интересов — алгоритмы компрессии видеоинформации, моделирование сетей связи, алгоритмы цифровой обработки изображений и встроенные системы.

Эл. адрес: alex@chkv.net

**ШАКИН
Олег
Васильевич**



Профессор, старший научный сотрудник кафедры электроники и оптической связи Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1968 году окончил Днепропетровский государственный университет имени 300-летия Воссоединения Украины с Россией по специальности «Физика и электрофизика».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 110 научных публикаций и 10 патентов на изобретения.

Область научных интересов — лазерные информационные технологии, акустооптика, микро- и нано-электромеханические устройства, тонкопленочные устройства.

Эл. адрес: oshakin@mail.ru

**ШАЛЫТО
Анатолий
Абрамович**



Заведующий кафедрой технологического программирования Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ученый секретарь НПО «Аврора».

В 1971 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 250 научных публикаций, трех монографий и 70 изобретений.

Область научных интересов — системы логического управления, автоматное программирование.

Эл. адрес: shalyto@mail.ifmo.ru

УДК 519.61:511-33

К вопросу существования матриц Мерсенна и Адамара

Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 2–8.

Рассматриваются условия существования матриц Мерсенна. На примере анализа условий существования матриц Белевича показано, что ограничения, характерные для целочисленных матриц, не сказываются на матрицах с рациональными и иррациональными значениями уровней, к которым принадлежат матрицы Мерсенна. Приводится зависимость значений уровней от порядка матрицы Мерсенна, показывается отсутствие особых точек на графике этой зависимости. Комментируется связь гипотез существования матриц Адамара и Мерсенна.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича, матрицы Мерсенна, M-матрицы, гипотеза существования.

Список лит.: 15 назв.

УДК 535.241.13:534

Методы инженерного расчета схемы электрического согласования акустооптического модулятора

Шакин О. В., Хансуваров Р. А., Колосков М. И. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 9–12.

Представлена методика расчетов параметров элементов акустооптического модулятора. С ее помощью рассчитаны электрооптическая частотная характеристика акустооптического модулятора, параметры электрической эквивалентной схемы пьезопреобразователя по методу Фано, определены геометрические размеры электрода пьезопреобразователя. Приведены расчеты амплитудно-частотной характеристики согласующей цепи, частотной характеристики изотропного акустооптического взаимодействия и затухания акустической волны в светозвукопроводе. Эти величины используются в расчете электрооптической частотной характеристики акустооптического модулятора. При его разработке параметры указанной характеристики являются одним из основных требований.

Ключевые слова — акустооптический модулятор, электрооптическая частотная характеристика, схема согласования, пьезопреобразователь.

Список лит.: 3 назв.

UDC 519.61:511-33

On the Issue of Existence of Hadamard and Mersenne Matrices

Balonin N. A., Sergeev M. B. IUS, 2013. N 1. P. 2–8.

Conditions of existence of Mersenne Matrices have been considered. Using an analysis of existence conditions of Belevich Matrices it is shown that limitations characteristic for integer matrices do not cover matrices of rational and irrational-valued levels which Mersenne Matrices belong to. A dependency of level values on Mersenne Matrices order has been given, the absence of special points in the dependency plot has been shown. The connection of hypotheses on Mersenne and Hadamard Matrices existence has been discussed.

Keywords — Orthogonal Matrices, Hadamard Matrices, Belevich Matrices, Mersenne Matrices, M-Matrices, Existence Hypothesis

Refs: 15 titles.

UDC 535.241.13:534

Engineering Calculation Methods for an Electrical Matching Circuit of an Acoustic-Optic Modulator

Shakin O. V., Khansuvarov R. A., Koloskov M. I. IUS, 2013. N 5. P. 9–12.

There has been presented the calculating method of parameters of an acoustic-optic modulator. Using this method there were calculated electro-optical frequency characteristics of acoustic-optical modulator and parameters of an electrical equivalent circuit of a piezoelectric transducer by method of Fano. Geometric dimensions of a piezoelectric transducer electrode were identified. There were provided calculations for a frequency response of matching circuit, a frequency response of isotropic acoustic-optical interaction and attenuation of acoustic waves in an acoustic-optical cable. These values are used for calculations of a frequency response of an electro-acousto-optic modulator. The parameters of this response are the main requirements during development of an acoustic-optical modulator.

Keywords — Acoustic-Optical Modulator, Electro-Optical Frequency characteristics, Matching Circuit, Piezoelectric Transducer.

Refs: 3 titles.

УДК 629.78

Исследование проблемы безопасного полета наноспутников при их выведении на низкие орбиты

Аваряскин Д. П., Белоконов И. В. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 13–18.

Верхние ступени ракет-носителей могут быть использованы для попутного запуска наноспутников. Решение поставленной задачи позволит обосновать возможность безопасного отделения наноспутников. В силу того, что после отделения основной полезной нагрузки орбитальная ступень приобретает угловую скорость, величина и направление которой заранее неизвестны, проведено стохастическое исследование, которое позволило разработать методику выбора параметров управления отделением (величину скорости и время отделения наноспутника), исключающих возможность возникновения соударения при последующем движении. Численные результаты приводятся для запуска с верхней ступени ракеты-носителя «Союз».

Ключевые слова — наноспутник, орбитальная ступень, ракета-носитель, полезная нагрузка, безопасное движение.

Список лит.: 6 назв.

УДК 62-506.1 (047)

Алгоритм компенсации неизвестных мультигармонических возмущений для объектов с запаздыванием по управлению

Фуртат И. Б. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 19–25.

Рассмотрено решение задачи компенсации неизвестных периодических возмущений для линейных объектов с запаздыванием в управлении. Предполагалось, что возмущение представляет собой конечную сумму синусоидальных сигналов с неизвестными амплитудами, кратными частотами и фазами. Для построения компенсатора использовался адаптивный идентификатор частот синусоидальных сигналов, основанный на методе скоростного градиента. Для компенсации возмущений применялся метод вспомогательного контура. Полученный алгоритм обобщен для управления динамической сетью с коммуникационным запаздыванием. В результате синтезированная система управления обеспечивает точную компенсацию возмущений. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие эффективность предложенной схемы.

Ключевые слова — объект с запаздыванием по управлению, компенсация возмущений, идентификация.

Список лит.: 14 назв.

UDC 629.78

Researching the Problem of Safe Flight of Nanosatellites during Low Earth Orbit Launching

Avaryashkin D. P., Belokonov I. V. IUS, 2013. N 5. P. 13–18.

Upper stages of launch vehicles can be used for piggy back launching of nanosatellites. The solution of this problem will substantiate a possibility of safe separation of nanosatellites from launch vehicles. Due to the fact that after the primary payload is separated an orbital stage gets angular velocity which magnitude and direction are not known preliminary, there were conducted stochastic studies to develop a methodology for selecting control parameters (velocity and separation time of a nanosatellite), excluding a possibility of collision.

Keywords — Nansatellite, Orbital Stage, Launch Vehicle, Payload, Safe Motion.

Refs: 6 titles.

UDC 62-506.1 (047)

The Compensating Algorithm of Unknown Multi harmonic Disturbances for Plants with Input Delay

Furtat I. B. IUS, 2013. N 5. P. 19–25.

There has been considered the solution of a problem of compensation of unknown periodic disturbances for linear plants with control delay. It was assumed that disturbance was equal to the finite sum of sinusoidal signals with unknown amplitudes, phases, and multiple frequencies. An adaptive frequency identifier of sinusoidal signals based on speed gradient method has been used to develop a compensator. There has been used an auxiliary circuit for disturbances compensation. The resulting algorithm was consolidated to control dynamic networks with a communication delay. As a result the synthesized control system provides accurate compensation of disturbances. Simulation results illustrating effectiveness of the proposed scheme are provided.

Keywords — Plant with Input Delay, Disturbances Compensation, Identification.

Refs: 14 titles.

УДК 621.396

Моделирование конфликта сложных радиотехнических систем методом параллельных развивающихся стохастических процессов

Мальцев Г. Н., Вознюк В. В., Туктамышев М. Р. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 26–33.

Предложен методический аппарат построения моделей функционирования конфликтующих сложных радиотехнических систем на основе метода описания параллельных развивающихся стохастических процессов. Моделируемый конфликт представляется совокупностью взаимодействующих случайных дискретно-событийных процессов, заданных сетевой структурой типа сети Петри. Представлен набор подсетей и функций переходов, позволяющий описать радиоэлектронный конфликт системы радиосвязи с комплексом радиопротиводействия. Приведены результаты исследования временных характеристик задержки передачи сообщений в условиях преднамеренных помех с использованием программной модели конфликта, построенной в соответствии с рассмотренной методикой.

Ключевые слова — конфликт сложных радиотехнических систем, методы моделирования, радиоэлектронный конфликт, моделирование конфликта.

Список лит.: 10 назв.

УДК 519.651

Кластеризация авторегрессионных моделей речевых сигналов по критерию минимума информационного рассогласования Кульбака — Лейблера

Губочкин И. В., Карпов Н. В. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 34–42.

Решается задача кластеризации множества авторегрессионных моделей речевых сигналов в рамках теоретико-информационного подхода. Для этого был разработан алгоритм нахождения оптимальных параметров авторегрессионной модели в смысле минимума информационного рассогласования Кульбака — Лейблера. На его основе проведена модификация известного алгоритма кластеризации k -средних. Экспериментально исследована эффективность применения разработанных алгоритмов при дикторонезависимом распознавании изолированных слов с использованием аппарата скрытых марковских моделей с дискретным распределением вероятностей наблюдений. Установлено, что наилучшие результаты по точности распознавания достигаются при использовании коэффициентов линейного предсказания с неравномерным частотным разрешением в качестве вектора признаков и размере кодовой книги векторного квантователя, равном 256.

Ключевые слова — автоматическое распознавание речи, авторегрессионная модель, информационное рассогласование, центроид, кластер.

Список лит.: 30 назв.

UDC 621.396

Modeling the Conflict of Complex Radio Engineering Systems by the Method of Parallel Developing Stochastic Processes

Maltsev G. N., Voznyuk V. V., Tuktamyshev M. R. IUS, 2013. N 5. P. 26–33.

There has been proposed a methodical apparatus for construction of conflicting complex radio engineering systems models on the basis of the method of description of parallel developing equilibrium processes. The simulated conflict was represented by a set of interacting casual discrete-event processes which is set by a network structure of Petri type net. There has been given a set of subnets and transition functions allowing to describe the radio-electronic conflict of a radio communication system and a complex of radio counteraction. Results of the research on temporary delay characteristics of messages transmission in the conditions of deliberate noises using a software model of the conflict constructed according to the considered method have been provided.

Keywords — Conflict of Complex Radio Engineering Systems, Modeling Methods, Radio-electronic Conflict, Conflict Modeling.

Refs: 10 titles.

UDC 519.651

Clustering of Speech Signal Autoregressive Models by Kullback-Leibler Information Divergence Minimum Criterion

Gubochkin I. V., Karpov N. V. IUS, 2013. N 5. P. 34–42.

There has been solved the problem of clustering a set of speech signal autoregressive models in the framework of the information-theoretic approach. Therefore, an algorithm to find optimal parameters of the autoregressive model in terms of Kullback-Leibler information divergence minimum was developed. Based on it the well-known k -means clustering algorithm was modified. There have been conducted experimental studies on efficiency of the developed algorithms applied to speaker independent isolated words recognition using discrete hidden Markov models. It has been identified that the best results of recognition accuracy are achieved using warped linear predictive coefficients as a feature vector and a vector quantizer codebook equal to 256.

Keywords — Automatic Speech Recognition, Autoregressive Model, Information Divergence, Centroid, Cluster.

Refs: 30 titles.

УДК 004.05

Разработка и автоматическая верификация параллельных автоматных программ

Лукин М. А., Шалыто А. А. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 43–50.

Рассмотрен комплексный подход к разработке и верификации параллельных автоматных программ, в которых иерархические автоматы могут реализовываться в разных потоках и взаимодействовать друг с другом. Предложен интерактивный подход к верификации параллельных автоматных программ при помощи инструментального средства Spin, который включает в себя автоматическое построение модели на языке Promela, приведение LTL-формулы в формат, определяемый инструментальным средством Spin, и построение контрпримера в терминах автоматов.

Ключевые слова — автоматы, параллельные автоматные программы, верификация, проверка моделей, линейная темпоральная логика, Spin.

Список лит.: 46 назв.

УДК 658.512.22

Программная реализация метеорологической поддержки замкнутой системы управления «Природа-техногеника»

Сольнищев Р. И., До Суан Чо. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 51–55.

Рассматриваются вопросы разработки программно-обеспечения метеорологической поддержки замкнутой системы управления «Природа-техногеника», в том числе SQL server 2012 построения баз данных, структуры, модули программного обеспечения, интерфейсы связей. Предложены основные запросы, используемые в среде MatLab для работы с базами данных.

Ключевые слова — экология, загрязняющие вещества, программирование, метеорологическое обеспечение, базы данных, SQL-запрос.

Список лит.: 7 назв.

УДК 004.453

Приложение для автоматизации процессов установки и запуска GNU/Linux-окружения на устройствах под управлением Android

Скшидлевский А. А. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 56–60.

Проводится обзор основных функций разработанного программного обеспечения для автоматизации установки GNU/Linux-дистрибутивов и запуска Linux-приложений на устройствах под управлением Android. Даны примеры его возможного использования, сравнение с аналогами. Описываются принципы работы программного обеспечения. Приведены оценка производительности и статистика по апробации.

Ключевые слова — мобильные устройства, операционные системы, программное обеспечение, Android, Linux.

Список лит.: 3 назв.

UDC 004.05

Development and Automatic Verification of Parallel Automata-Based Software

Lukin M. A., Shalyto A. A. IUS, 2013. N 5. P. 43–50.

There has been considered a complex approach to development and verification of parallel automata-based programs where hierarchical automata can be implemented in separate flows and interact. The interactive approach to verification of parallel automata-based programs using Spin has been proposed. It includes robotized model construction in Promela, LTL-formula conversion into Spin format and construction of a counter-example in automata terms.

Keywords — Automaton, Parallel Automata-Based Software, Verification, Model Checking, Linear Temporal Logics, Spin.

Refs: 46 titles.

UDC 658.512.22

The Software Providing Meteorological Support for a Closed Control System «Nature-Technogenics»

Solnitsev R. I., Do Xuan Cho. IUS, 2013. N 5. P. 51–55.

There have been considered the issues of development of the software to provide meteorological support for a closed control system “Nature-Technogenics” including construction of the server SQL 2012, databases, structure, units of the software, and communication interfaces. There have been proposed basic requests used in Matlab environment to operate the databases.

Keywords — Ecology, Pollutants, Programming, Meteorological Service, Databases, SQL-Request.

Refs: 7 titles.

UDC 004.453

The Software to Automate Processes of Installation and Launch of GNU/Linux Applications on Android Devices

Skshidlevsky A. A. IUS, 2013. N 5. P. 56–60.

The basic functions of the software to automate installation of GNU/Linux distributions and launching Linux applications on Android devices have been overviewed. Examples of its possible applications and comparison with the analogues have been given. Principles of the software operation have been described. Evaluation of performance and test statistics have been provided.

Keywords — Mobile Devices, Operating Systems, Software, Android, Linux.

Refs: 3 titles.

УДК 621.39

К вопросу единства терминологии в задачах физической защиты объектов

Волхонский В. В., Малышкин С. Л. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 61–68.

Анализируются термины и определения физической защиты, используемые в различных предметно-ориентированных областях информационной, ядерной, антикриминальной и антитеррористической безопасности, в государственных стандартах и литературных источниках. Показаны существенные различия в используемых определениях. Предлагаются единые обоснованные определения физической защиты и системы физической защиты, согласующиеся с нормативными документами и стандартами и позволяющие устранить разночтения в терминологии в области методов и средств обеспечения физической безопасности объектов.

Ключевые слова — физическая защита, физическая безопасность, терминология, определения.

Список лит.: 19 назв.

УДК 621.397

Кодирование с неравной защитой компрессированного видео в беспроводных сетях

Таубин Ф. А., Чуйков А. В. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 69–79.

Рассматривается схема передачи компрессированного видео, базирующаяся на разбиении битового потока в видеокодере на подпотоки (с учетом степени важности основных синтаксических единиц) и последующем помехоустойчивом кодировании с неравной защитой подпотоков от канальных ошибок. Для кодирования с неравной защитой используется класс совместимых по скорости перфорированных кодов повторения-накопления (РА-кодов), позволяющих обеспечить высокую помехоустойчивость и обладающих весьма привлекательными обменными соотношениями «помехоустойчивость — сложность реализации». Предлагается подход к согласованному выбору основных параметров рассматриваемой схемы передачи, включающий, в частности, обмен между скоростью компрессированного видео и скоростями РА-кодов.

Ключевые слова — потоковое видео, беспроводные сети, пиковое отношение сигнал/шум, помехоустойчивое кодирование с неравной защитой, коды повторения-накопления.

Список лит.: 16 назв.

UDC 621.39

The Issue of Unity of Terminology in Physical Protection Applications

Volkhonskiy V. V., Malyshkin S. L. IUS, 2013. N 5. P. 61–68.

Terms and definitions of physical protection used in different applications such as information, nuclear, anti-criminal and anti-terroristic security, state standards and reference books have been analyzed. Significant difference in terminology has been shown. Integrated single definitions of physical protection and physical protection system consistent with regulatory documents and standards have been proposed, they allow avoiding terminological discrepancies of methods and ways to provide physical protection of objects.

Keywords — Physical Protection, Physical Security, Terminology, Definitions.

Refs: 19 titles.

UDC 621.397

Encoding with Unequal Error Protection of Compressed Video in Wireless Networks

Taubin F. A., Chuiikov A. V. IUS, 2013. N 5. P. 69–79.

There has been considered a scheme of compressed video streaming based on dividing an encoded video bit-stream in priority classes (according to their significance) and successive unequal error protection of these classes. Rate-compatible punctured repeat-accumulate codes (RA) are used for encoding with unequal error protection. These codes are capable of operating at very low bit-error rate and demonstrate quite nice trade-off between performance and complexity. An approach to the substantiated choice of basic parameters of the proposed transmission scheme which includes exchange of compressed video rate and RA codes rate has been discussed.

Keywords — Streaming Video, Wireless Networks, Peak Signal-to-Noise Ratio, Unequal Error Protection, Repeat-Accumulate Codes.

Refs: 16 titles.

УДК 510.6:683.3:531

Управление живучестью сложной системы на основе логико-вероятностного прогнозирования

Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Зиняков В. Ю. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 80–85.

Рассматривается метод управления живучестью сложной системы с использованием моделированного изменения вероятности отказа с течением времени и деградации системы. Предлагается подход к проблеме учета связей между блоками сложной системы. Описывается алгоритм моделирования, сочетающий логико-вероятностное и логико-лингвистическое прогнозирование процессов изменения параметров во времени. Использование моделирования позволяет получить резерв времени на проведение необходимых операций по управлению живучестью системы и тем самым повысить ее надежность.

Ключевые слова — сложная логическая функция, логико-вероятностное моделирование, логико-лингвистическое моделирование, прогнозирование, управление сложной системы.

Список лит.: 7 назв.

УДК 629.1.04

Сокращение времени производственного цикла морской транспортировки нефти на основе внедрения методов менеджмента и технологических инноваций

Коршунов Г. И., Ли Шунь Минь. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 86–92.

Предложены технические средства, модели и методы для уменьшения времени погрузки/выгрузки нефти и сокращения производственного цикла транспортировки нефти морскими танкерами. Рассмотрены особенности грузовых систем, предложено использование быстроразъемного соединения с «плавающим шаром». Представлены математические модели процессов загрузки нефти на базе аппроксимации характеристик насоса, а также модель баланса расходов и напоров на основе гидравлических аналогов уравнений Кирхгофа с учетом местных гидравлических сопротивлений. Разработаны система моделирования и алгоритм погрузки нефти, обеспечивающие близкое к оптимальному изменение скорости потока нефти и сокращение времени по критерию Lead Time.

Ключевые слова — время производственного цикла, быстроразъемное устройство, баланс расходов в сети, баланс напоров в сети, метод узловых напоров, моделирование процесса погрузки танкера.

Список лит.: 9 назв.

UDC 510.6:683.3:531

Control of Complex System Persistence Based on Logical Probabilistic Forecasting

Gorodetsky A. E., Tarasova I. L., Ziniakov V. Yu. IUS, 2013. N 5. P. 80–85.

There has been considered a method of controlling persistence of a complex system using modeled change of probabilistic failure in time system degrading. There has been proposed an approach to the problem of connections between blocks within the complex system. A simulation algorithm that combines logical probabilistic and logical linguistic forecasting of processes of parameter change in time has been described. Using modeling one can receive a time reserve for performing the required operations of the system persistence control, thus, enhancing its reliability.

Keywords — Complex Logical Function, Logical Probabilistic Modeling, Logical Linguistic Modeling, Forecasting, Complex System Persistence Control.

Refs: 7 titles.

UDC 629.1.04

Reduction of Offshore Oil Transport Lead Time Based on Implementation of Management Methods and Technological Innovations

Korshunov G. I., Li Shun Min. IUS, 2013. N 5. P. 86–92.

There have been proposed technical tools, models and methods to reduce oil loading / unloading time and to reduce tanker offshore oil transportation cycle. Freight system peculiarities have been considered, use of a quick release device with a «floating ball» has been proposed. Mathematical models of oil loading process based on pump characteristics approximation have been considered. Cost and pressure balance model based on hydraulic analogues of Kirchhoff equations including local hydraulic resistance has been suggested. The modeling system and algorithm of oil loading process providing nearly optimal flow changes and reducing oil transportation time in accordance with LEAD TIME criterion have been designed.

Keywords — Lead Time, Quick Release Device, Balance of Costs in the Network, Balance of Pressures in the Network, Nodal Heads, Simulation of Tanker Loading.

Refs: 9 titles.

УДК 330.3

Методы оптимального распределения ресурсов при реализации программ повышения устойчивости промышленного предприятия

Колесников А. М., Сторощук А. Н. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 93–96.

Рассматривается проблема разработки и применения экономического механизма управления устойчивостью производственного предприятия, в частности, теоретические вопросы совершенствования методики оценки угроз устойчивому развитию промышленных предприятий на ранней стадии их возникновения на основе оптимального распределения ресурсов при реализации программ адаптивного управления. Для анализа устойчивости производственного предприятия выдвигается целесообразность выявления сети проблемных ситуаций, которые и отражают основные угрозы его устойчивому развитию.

Ключевые слова — устойчивость предприятия, программа повышения устойчивости, оптимальное распределение ограниченных ресурсов, индекс устойчивости, метод динамического программирования.

Список лит.: 3 назв.

УДК 519.61:511-33

Взвешенная конференц-матрица, обобщающая матрицу Белевича на 22-м порядке

Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Информационно-управляющие системы, 2013. № 5. С. 97–98.

Приводится взвешенная конференц-матрица $W(n, n-2)$, обобщающая матрицу Белевича на порядке 22. Дается оценка максимальности ее определителя на классе квазиортогональных матриц этого порядка сравнением с экстремальной модульно шестиуровневой M-матрицей диагонального типа.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, квазиортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Белевича, взвешенные конференц-матрицы.

Список лит.: 11 назв.

UDC 330.3

Methods of Optimal Distribution of Resources Implementing Programs to Enhance Sustainability of an Industrial Enterprise

Kolesnikov A. M., Storoschuk A. N. IUS, 2013. N 5. P. 93–96.

There has been considered a scientific problem of development and application of an economic mechanism for controlling sustainability of an industrial enterprise, in particular, theoretical issues of improving methodology of assessment of threats to sustainable development of industrial enterprises in their early stages based on optimal distribution of resources implementing adaptive management programs. To analyze sustainability of an industrial enterprise there has been reviewed expediency of identifying network problem issues that reflect major threats to its sustainable development.

Keywords — Sustainability of an Enterprise, Sustainability Enhancement Program, Optimal Distribution of Scarce Resources, Sustainability Index, Dynamic Programming Method.

Refs: 3 titles.

UDC 519.61:511-33

Weighted Conference Matrix Generalizing Belevich Matrix at the 22nd Order

Balonin N. A., Sergeev M. B. IUS, 2013. N 5. P. 97–98.

There has been given a weighted conference matrix $W(n, n-2)$ generalizing Belevich matrix at the 22nd order. Maximum of its determinant in the class of quasi-orthogonal matrices of this order has been evaluated by comparison with an extreme modular 6-level diagonal type M-matrix.

Keywords — Orthogonal Matrices, Quasi-Orthogonal Matrices, Hadamard Matrices, Belevich Matrices, Weighted Conference Matrices

Refs: 11 titles.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), т. к. этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); Adobellustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai).

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта, например, в формате *.ai, *.esp, *.wmf, *.svg.

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисуночных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы предоставляйте в двух вариантах: первый на языках оригиналов и второй — перевод (не транслитерация, а перевод) списка на английский язык.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,

Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru