

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены различные аспекты создания цифровой голографической системы для исследования геометрических параметров динамических объектов. Представлена архитектура системы и алгоритмы восстановления цифровых голограмм, их расшифровки, позволяющие эффективно использовать параллельные вычисления по технологии GPGPU. Это позволяет осуществлять измерения геометрических параметров объектов в режиме реального времени.

Ключевые слова: цифровая голография, голограмма, измерительная система.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 14-08-01100).

Когерентно-оптические методы являются одним из наиболее перспективных инструментов экспериментального исследования деформационных свойств материалов и анализа напряженно-деформированного состояния. Голографические системы рассматривались как наиболее перспективные технологии в экспериментальной механике в 1970–1990 гг., их возможности и ограничения подробно исследованы и описаны в литературе [1–5]. Однако необходимость использования промежуточной голограммы требовала использования фотохимических процессов и существенно сдерживала распространение таких систем. Появление в последние годы цифровых голографических систем, в которых регистрация голограмм осуществляется с использованием матрицы фотоприемников, позволило сделать их значительно более технологичными.

В цифровой голографии осуществляется компьютерная реконструкция объектной волны. При этом метод обладает уникальным свойством — в цифровой голографии фаза восстановленной объектной волны может быть рассчитана по ОДНОЙ ГОЛОГРАММЕ [6]. Этот факт обеспечивает принципиально новую возможность — запись серии одиночных голограмм, соответствующих различным состояниям объекта, и последующее получение (путем их попарного интерферометрического сравнения) зависимости перемещений и деформа-

ций не только от координат, но и от времени. Таким образом обеспечивается возможность исследования на качественно новом уровне любых процессов деформирования, включая *нестационарные* и *динамические* процессы (термическое расширение, текучесть, ползучесть, случайные и затухающие колебания, распространение упругих волн при ударных и взрывных воздействиях и т.д.).

Другими важными преимуществами цифровой голографии являются:

- возможность определения информации сразу по всему полю объекта;
- возможность автоматического определения знака перемещений;
- возможность измерения сверхмалых перемещений, не приводящих к появлению интерференционных полос;
- возможность компьютерной обработки отдельных фрагментов голограмм;
- возможность совмещения в одной компьютерной программе измерений поля перемещений и численных методов анализа напряженно-деформируемого состояния.

Таким образом, метод цифровой голографической интерферометрии обеспечивает наиболее широкие возможности при анализе напряженно-деформируемого состояния по сравнению с другими методами.

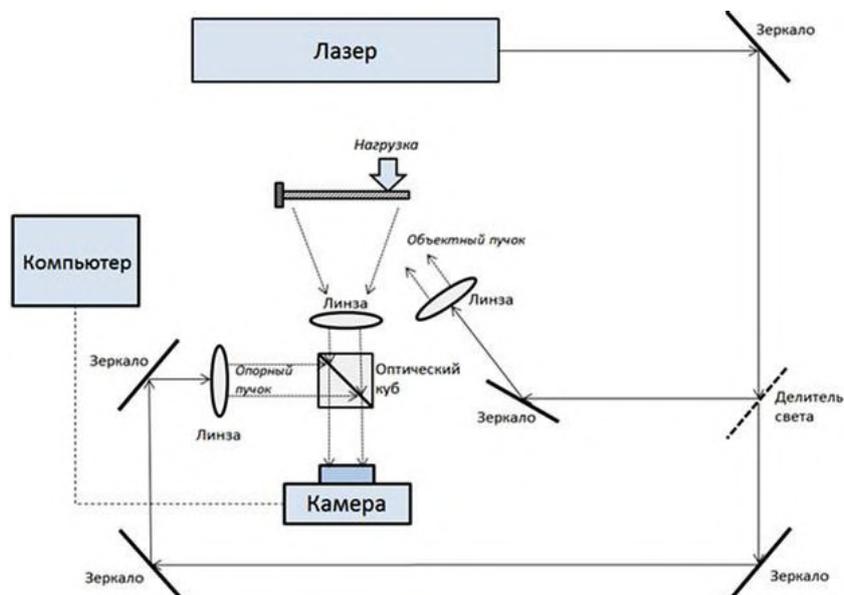


Рис. 1. Оптическая схема цифровой голографической системы

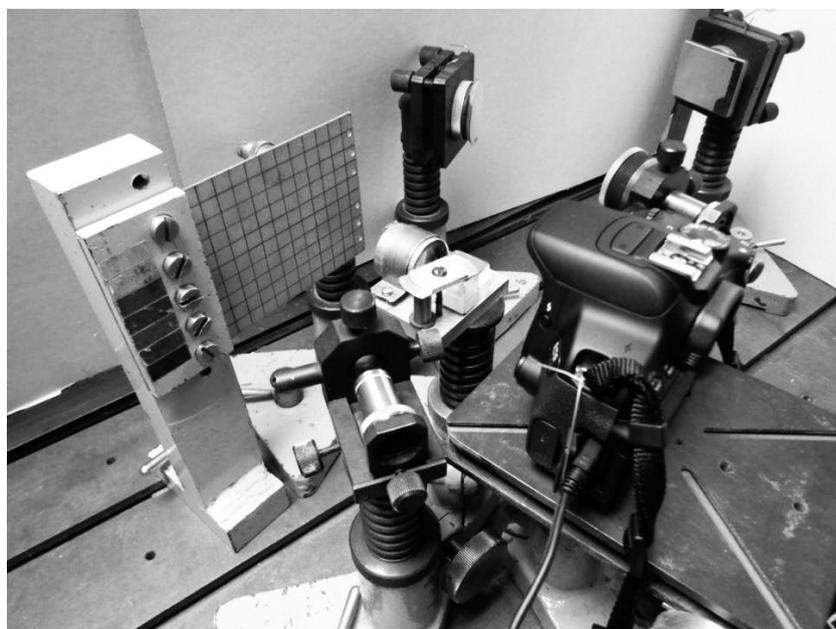


Рис. 2. Внешний вид цифровой голографической системы

На рис. 1, 2 показаны оптическая схема и внешний вид цифровой голографической измерительной системы.

Излучение лазера делится на объектный пучок, освещающий объект и опорный пучок, непосредственно поступающий на приемный сенсор цифровой камеры. Объектный пучок освещает объект в направлении k_1 . Часть света, отраженная объектом в направлении k_2 , называемом «направление наблюдения», проходит через оптическую фокусирующую систему и формирует на приемном сенсоре цифровой видеокамеры изображение объекта. Гол로그램 сфокусированного изображения формируется на матрице цифровой камеры как результат интерференции между опорным и объектным пучками. Диафрагма служит для ограничения пространственных частот возникающей интерференционной структуры и приведения ее в соответствие

с разрешающей способностью приемного сенсора. При этом наложение опорного и объектного пучков на приемной матрице камеры осуществляется с помощью светоделительного кубика, который устанавливается так, чтобы опорный пучок исходил в направлении сенсора камеры из мнимого источника, расположенного вблизи апертуры.

Пусть $R(x,y)$ — гладкая опорная волна, а $U(x,y)$ — объектная волна, исходящая от объекта. Тогда интенсивность, зарегистрированная на матрице приемной видеокамеры, описывается выражением [7]:

$$I_H(x,y) = |R_H(x,y)|^2 + |U_H(x,y)|^2 + R_H^*(x,y) U_H(x,y) + R_H(x,y) U_H^*(x,y), \quad (1)$$

где H — индекс, обозначающий плоскость голограммы, а индекс $*$ обозначает комплексное сопряжение. Интенсивность, описываемая уравнением (1), регистрируется в виде массива пикселей ($M \times N$),

имеющих размеры $\Delta x \times \Delta y$, что позволяет записать значение интенсивности в виде функции $I_H(m\Delta x, n\Delta y)$, где m и n — целые числа. Последние два члена уравнения (1) содержат информацию об амплитуде и фазе объектной волны. Эта информация может быть выделена с помощью пространственной фильтрации с использованием метода преобразования Фурье [8]. Путем применения преобразования Фурье к зарегистрированному массиву можно выделить и отфильтровать один из двух последних членов уравнения (1). Оба этих члена разделяются в Фурье-плоскости в результате небольшого наклона опорного пучка по отношению к объектному. После фильтрации и обратного преобразования Фурье мы получаем комплексную амплитуду объектного волнового фронта. Из полученной в цифровом виде комплексной амплитуды $U_H(m\Delta x, n\Delta y)$ может быть рассчитана локальная фаза ϕ_{Hw} волнового фронта объектной волны в диапазоне $0-2\pi$ по следующим соотношениям:

$$S_y = \text{Im}[U_H(m\Delta x, n\Delta y)], S_x = \text{Re}[U_H(m\Delta x, n\Delta y)] \\ \text{и } \phi_{Hw}(m\Delta x, n\Delta y) = \arctg(S_y/S_x) \quad (2a)$$

$$\phi_{Hw} = \arctg(S_y/S_x), \quad (2b)$$

где Re и Im обозначают действительную и мнимую часть комплексного числа соответственно.

Абсолютное значение полной фазы ϕ определяется с учетом номера интерференционной полосы N .

$$\phi = \phi_{Hw} + 2\pi N. \quad (3)$$

Путем вычитания значений фаз объектного поля, рассчитанных для двух состояний объекта (например, до приложения нагрузки и после), можно получить значение абсолютной разности фаз, которая позволяет рассчитать смещение точек объекта d в результате приложения нагрузки в направлении s по формуле:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)d \cdot s, \quad (4)$$

где λ — длина волны излучения лазера, s — вектор чувствительности интерферометра, определяемый выражением $s = k_i - k_v$, где k_i и k_v — единичные векторы освещения и наблюдения соответственно.

Для измерения полного вектора перемещений используется схема с тремя различными векторами чувствительности, что позволяет получить три линейно-независимых уравнения вида (4) и рассчитать проекции полного вектора на оси координат [9].

Используя современную технологию расчетов на ГПУ (графическое процессорное устройство) можно достичь более высокого быстродействия реконструкции и анализа цифровых голограмм. В работе [10] достигнутая скорость обработки цифровых голограмм составила — 24/сек. Отметим, что при этом производится вычисление только амплитудных характеристик без учета фазы, что существенно ограничивает функциональные характеристики системы (отсутствует информация о глубине рельефа).

В случае учета фазы реальная скорость обработки будет гораздо ниже. В зависимости от размера голограммы время вычислений составляет от десятков секунд до нескольких минут [11]. Если характеристики динамического объекта изменяются во времени достаточно быстро, то такой производительности вычислений может быть недостаточно для обеспечения измерений в режиме реального времени.

Основным критерием работы цифровой голографической системы в режиме реального времени является время измерений, которое в основном определяется временем вычисления абсолютной фазы. По различным оценкам эта величина составляет от нескольких минут до нескольких часов при выполнении расчетов на ЭВМ общего назначения. Указанный недостаток не преодолен в современных, как отечественных, так и зарубежных цифровых голографических системах. В настоящее время реализованы только методы скоростной регистрации цифровых голограмм, но не их обработка, что делает актуальной разработку и исследование новых принципов анализа цифровых голограмм.

Авторами предложены новые методы [1, 12, 13], основанные на применении принципов модульной арифметики, позволяющие устранить данное ограничение. Эти методы основаны на сравнительно новом разделе вычислительной математики — теории безошибочных вычислений [14]. Другой эквивалент этого термина — точные вычисления (exact computation). Теория безошибочных вычислений имеет дело с задачами, для которых входная информация представима набором целых чисел или многочленов с целыми коэффициентами. Основой ее является модульная или модулярная арифметика [14]. Интерес к таким алгоритмам вызван внутренним параллелизмом многомодулярной арифметики и появлением сверхмощных компьютеров, технологий использования графических процессоров для выполнения расчетов общего назначения. Целочисленные алгоритмы требуют безошибочных исходных данных, что невозможно при решении прикладных задач. Поэтому основное внимание авторы уделяют построению устойчивых параллельных алгоритмов. Авторскому коллективу в последние годы удалось существенно продвинуться в решении этой проблемы. Основой для использования целочисленных алгоритмов при анализе исходных данных, полученных с заданным уровнем погрешности, является анализ окрестности грубых промахов, образующейся при решении системы сравнений. Разработаны алгоритмы устранения фазовой неоднозначности образующейся при анализе цифровых голограмм. Однако использование разработанных алгоритмов сдерживается большим объемом вычислительных операций. Требуются дополнительные исследования с целью построения эффективных вычислительных схем, позволяющих существенно сократить число операций.

На основе предлагаемых в статье подходов разработана цифровая голографическая система реального времени для исследования динамических объектов. Это достигнуто путем модернизации цифровой голографической системы, таким образом, чтобы можно было получать голограммы с разными длинами волн. Для этой цели лазер имеет возможность перестройки длины волны. Тогда восстановление абсолютного значения объектной фазы можно получить путем решения системы сравнений, состоящей из значений локальных фаз, полученных для разных длин волн.

$$L = N_1\lambda_1 + \delta_1 + \varepsilon_1 = N_2\lambda_2 + \delta_2 + \varepsilon_2 = \dots = N_n\lambda_n + \delta_n + \varepsilon_n \quad (5)$$

здесь L — высота рельефа, N_1 и N_n — номер интерференционной полосы на интерферограмме, полученной для первой и n -ой длин волн соответственно, λ — длина волны лазера, ϕ — измеренные значения фаз, $\delta_1 = (\lambda_1/2\pi)\phi_1$ и $\delta_n = (\lambda_n/2\pi)\phi_n$ — нормированные значения локальных фаз для первой и n -ой длин

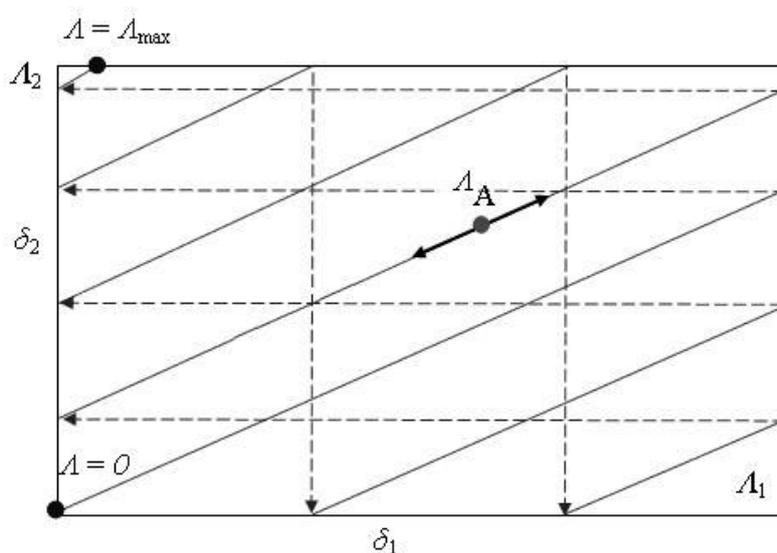


Рис. 3. Таблица решений системы сравнений (5) для двух длин волн

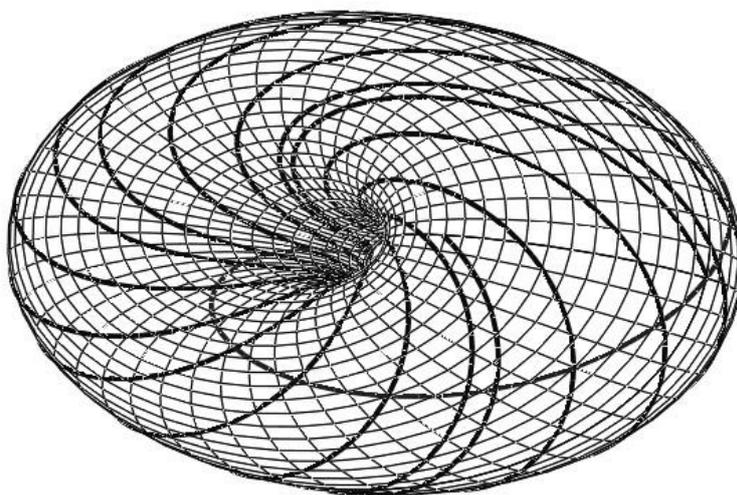


Рис. 4. Отображение таблицы решений в виде тора

волн соответственно, ε — погрешность измерения. Для решения системы сравнений (5) используются разработанные авторами целочисленные алгоритмы, основанные на модулярной алгебре [12, 13]. Реализация данных алгоритмов требует применения быстродействующих вычислительных средств, использующих параллелизм модулярной алгебры. Основой построения модулярных алгоритмов является свертка многомерной таблицы решений системы сравнений (5) в тор.

На рис. 3 показан двумерный случай таблицы возможных решений сравнений (5) для двух длин волн. Здесь объектная фаза изменяется от 0 до Λ_{\max} . Из рисунка следует, что одной из возможных значений высоты рельефа (точка Λ_A) соответствует одна комбинация двух функционально связанных локальных фаз, т.е. $\Lambda_A = f(\delta_1, \delta_2)$. В многомерном случае имеем набор двумерных таблиц (проекции) для различных сочетаний длин волн. Путем «склеивания» таблиц по вертикали и горизонтали получаем многомерный тор. Таким образом, абсолютное значение фазы будет однозначно определяться по-

ложением точки на поверхности тора. На рис. 4 показан двумерный тор, соответствующий свертке таблицы решений системы сравнений, показанной на рис. 3.

Отметим, что данный алгоритм инвариантен к профилю фазовой картины и не требует трудоемкого анализа фазовых переходов, как в классических методах разворачивания фазы [1], и позволяет получить абсолютное значение фазы непосредственно по локальным значениям фаз, полученных с разными длинами волн [1, 12, 13]. Это позволяет повысить скорость анализа цифровых голограмм на один — два порядка и в итоге решить основную задачу — реализовать цифровую голографическую систему, работающую в режиме реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов.

Предлагаемые методы анализа измерительной информации могут быть использованы в высокоскоростных методах измерений разности фаз объектного и предметного волновых фронтов при различных диапазонах длин волн (оптических,

акустических, методах радиоголографии и т.д.), а разработанные быстродействующие вычислительные алгоритмы на основе многомодулярной алгебры пригодны для решения широкого класса прикладных задач.

Библиографический список

1. Гужов, В. И. Компьютерная интерферометрия / В. И. Гужов, С. П. Ильиных. — Новосибирск : НГТУ, 2004. — 252 с.
2. R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, 2nd ed., Cambridge University, Cambridge, UK, 1989, Chap. 3.
3. Вест, Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест ; пер. с англ. — М. : Мир, 1982. — 504 с.
4. Голографические неразрушающие испытания / Под ред. Р. К. Эрфа ; пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1979. — 448 с.
5. Gurevich V., Gusev M., Begishev I., Redkorechev V. The experience of pulse holography application for factory environment // Proc. of Int. Conf. On Trends In Optical NDT, Lugano, Switzerland, 1999. — P. 214–221.
6. Schnars U., Jupter W., Direct recording of holograms by CCD-target and numerical reconstruction. *Applied Optics*, 33(2) : 179–181, 1994.
7. M. Takeda, Hideki, and S. Kobayashi, Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982.
8. U. Schnars, W. Jueptner, *Digital holography*, Springer Verlag., 2005.
9. Балтийский, С. А. Современные методы цифровой голографии / С. А. Балтийский, И. П. Гуров, С. Де Никола, Д. Коппола, П. Ферраро // Проблемы когерентной и нелинейной оптики ; под ред. И. П. Гурова, С. А. Козлова. — СПб. : СПбГУ ИТМО, 2004. — С. 91–117.

10. Shimobaba T, Sato Y, Miura J, Takenouchi M, Ito T. Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit. *Opt. Express*. 2008 ;16 ; 11776–11781.

11. P. Karasev, D. Campbell, and M. Richards. Obtaining a 35x Speedup in 2D Phase Unwrapping Using Commodity Graphics Processors. *Radar Conference, 2007 IEEE*, pages 574–578, April 2007.

12. Гужов, В. И. Коррекция систематических погрешностей при определении полной фазы в целочисленной интерферометрии / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Е. В. Картавых // Автометрия. — 2008. — Т. 44. — № 6. — С. 56–60.

13. Гужов, В. И. Решение проблемы фазовой неоднозначности методом целочисленной интерферометрии / В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Р. А. Кузнецов, А. Р. Вагизов // Автометрия. — 2013. — Т. 49. — № 2. — С. 85–91.

14. Грегори, Р., Кришнамурти Е. Безошибочные вычисления. Методы и приложения / Р. Грегори, Е. Кришнамурти ; пер. с англ. — М. : Мир, 1988. — 208 с.

ГУЖОВ Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).
ИЛЬИНЫХ Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры вычислительной техники НГТУ.

КУЗНЕЦОВ Роман Александрович, кандидат технических наук, старший инженер-программист ООО «Алавар.Ру», г. Москва.

КАБАК Евгений Семёнович, аспирант кафедры систем сбора и обработки данных НГТУ.
Адрес для переписки: isr51@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.10.2014 г.

© В. И. Гужов, С. П. Ильиных, Р. А. Кузнецов, Е. С. Кабак

Книжная полка

Латыев, С. Конструирование точных (оптических) приборов : учеб. пособие / С. Латыев. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб. : Лань, 2015. — 560 с. — ISBN 9785-8114-1734-6.

Учебное пособие посвящено основам конструирования современных точных приборов, типичными представителями которых являются оптические приборы, содержащие в своем составе механические, электронные и оптические функциональные устройства и элементы. Специфика конструирования таких приборов заключается в том, что их показатели качества и в первую очередь показатели точности, технологичности и надежности в существенной степени зависят от выполнения определенных методов, правил и принципов конструирования, способов и методов параметрического и точностного синтеза конструкций, знаний путей и приемов повышения целевых показателей качества при проектировании. Книга состоит из четырех частей. В первой части рассматриваются методы, общие правила и принципы конструирования точных приборов и их элементов. Во второй излагаются основы теории точности и понятия надежности приборов. Третья часть посвящена современным методам повышения качества приборов при проектировании, включая алгоритмическую (цифровую) коррекцию погрешностей. В четвертой части приводятся типовые конструкции сборочных единиц и элементов точных приборов, рассматриваются способы их юстировки и контроля. Учебное пособие предназначено для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений приборостроительного профиля, а также инженерно-технических работников промышленности.

Каплан, Б. Ю. Приборостроение. Введение в специальность : учеб. пособие (соответствует ФГОС 3-го поколения) / Б. Ю. Каплан. — М. : ИНФРА-М, 2014. — 112 с. — ISBN 978-5-16-006719-3.

В пособии дается объяснение областей деятельности, относящихся к приборостроению, показаны познавательная сущность измерений, их значение в развитии науки и техники. Рассмотрена система единиц СИ, даются начальные сведения об их методологических свойствах и характеристиках, о методах оценки погрешностей средств измерения.

КЛАССИФИКАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СИГНАЛОВ ПО ЦВЕТОВОЙ ШКАЛЕ

Предложен способ классификации распределений сигналов, основанный на их преобразовании в цветовой RGB-вектор.

Ключевые слова: идентификация, модель, классификация, классификационное дерево, распределение, сигнал, тестер.

Интеллектуальная мощь систем обработки данных во многом зависит от их способности проводить автоматическую классификацию анализируемых сигналов. В общепринятом смысле под классификацией понимается разделение группы объектов на некоторые части — подгруппы, внутри которых объекты имеют общие (в определенном смысле) свойства. Опцию классификации можно реализовать, используя методы, принятые в прикладной статистике и теории распознавания образов [1–3]. Однако, из-за математической и алгоритмической сложности, эти методы практически не применяются в системах реального времени.

Предлагаемые виртуальные инструменты используют новую методологию классификации сигналов вообще и их распознавания в частности. Эта методология основана на идеях и моделях *идентификационных измерений (ИИ) сигналов*, изложенных в статьях [4, 5] и монографиях [6–8]. При этом предполагается, что выборочная реализация сигнала обладает информационной избыточностью, в соответствии с которой вся информация о сигнале заключена в его форме. Измерение формы сигналов основано на преобразовании сигнала в особое число, названное идентификационным. Подобные числа характеризуют форму сигналов или их характеристик, что подтверждается разработанными идентификационными методами, описанными, например, в работах [9, 10]. Определение диапазона изменения того или иного идентификационного числа [11] дает возможность проводить операции над этими числами (по определенным законам), а значит, и над формами. Например, сложение случайных сигналов с различными формами законов распределений [12, 13], их умножение [14, 15], многократное сложение [16] и т.д. В случае отсутствия какой-либо априорной информации, модель сигнала формируется путем его структурной идентификации [17] с некоторым заранее выбранным набором так называемых «эталонных» моделей.

Проблема состоит в том, чтобы выбрать такие эталонные модели, которые допускают проведение операции упорядочения, следствием которой является образование подобия шкалы при классических измерениях [18–19]. В этом случае классификация реализуется очень просто — путем присвоения анализируемому сигналу имени ближайшей эталонной модели (реперной точки) [20, 21]. Подобное

решение было использовано, например, в работах [22–25], для доказательства возможности построения полностью измеримых иерархических классификаций для распределений мгновенных значений (PMЗ) сигналов.

Однако, в силу ограничения базисных эталонных моделей симметричными распределениями, число реперных точек (классов группирования) при линейной классификации составило всего 8. При этом асимметричные распределения вовсе не идентифицировались.

Целью данной работы является исследование возможности расширения классов группирования PMЗ сигналов.

Методика и инструменты исследования. Методика и инструменты исследования основаны на результатах, представленных в работах [26, 27], в которых было доказано существование аналогии между формой распределения мгновенных значений сигналов и цветовыми векторами RGB-системы.

Чтобы установить полное соответствие стандартной цветовой палитры, используемой, например, в графическом пакете Microsoft Paint, и формой PMЗ сигналов, необходимо соответствующим образом настроить цветовой тестер (Color tester). Цветовой тестер (рис. 1) является инструментом преобразования выборочной реализации сигнала $X(t)$ в компоненты RGB цветового вектора. Для этого используется виртуальный прибор типа Histogram, vi, который сортирует отсчеты входного сигнала по трем уровням. При этом было принято, что уровню с номером 0 соответствует мода R, уровню 1 — мода G, уровню 2 — мода B. Нормирование значений уровней проводилось по максимальному значению с помощью инструмента Array Max & Min. Для получения максимального диапазона изменения компонент цветового вектора, нормированные уровни умножались на 255 и округлялись до целых значений.

Цветовой код выборочной реализации сигнала формировался виртуальным прибором типа RGB to Color. Выходная информация представлялась значениями RGB-мод, цветового кода (Numeric 2) и визуализировалась в виде цветного поля в окне Out Box.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Во-первых, с помощью программных генераторов среды LabVIEW формировались выборки

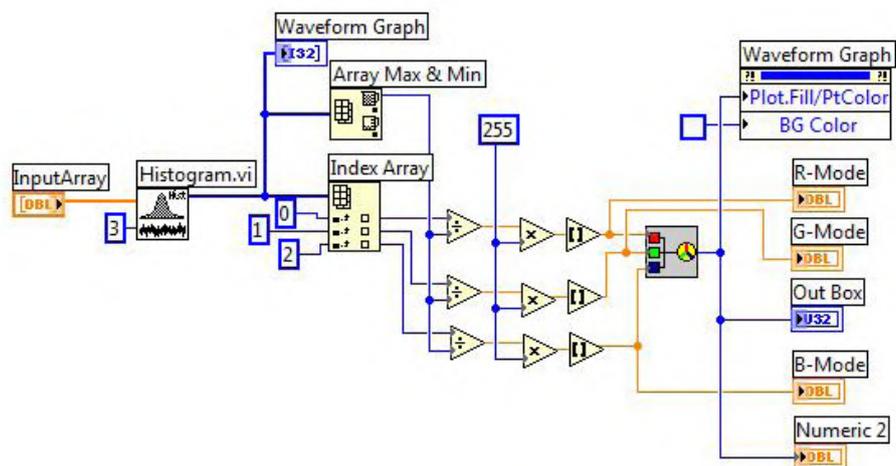


Рис. 1. Структура программного кода цветового тестера распределений

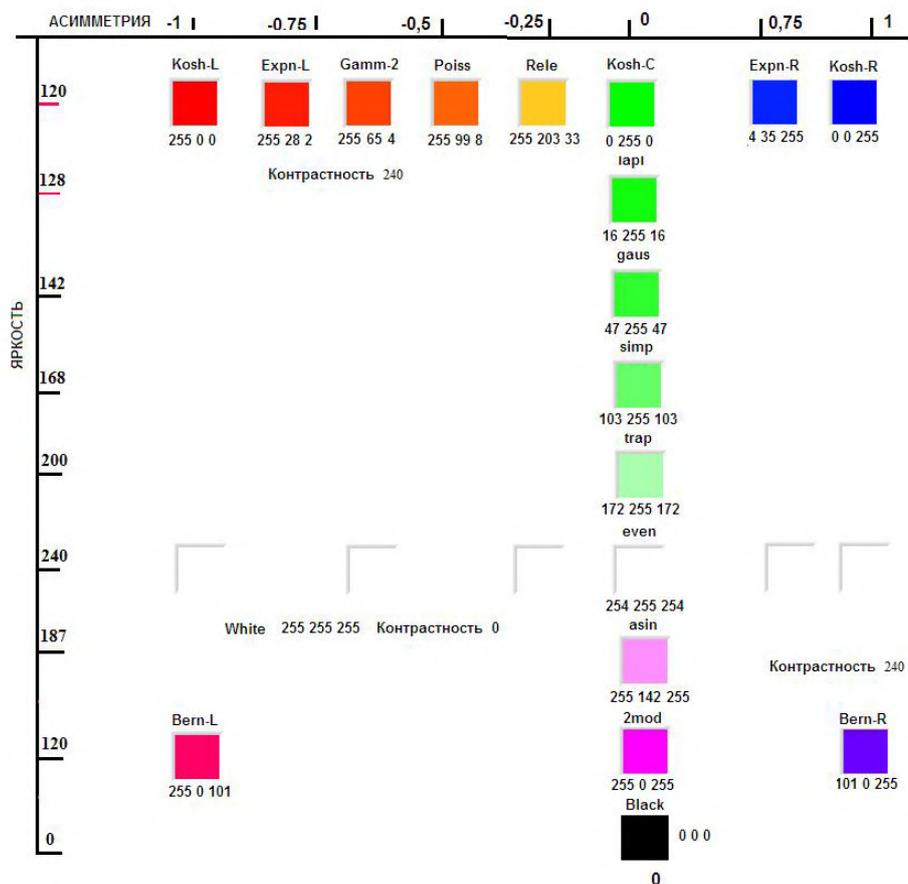


Рис. 2. «Цветовое» классификационное дерево распределений сигналов

случайных сигналов с симметричными (*2mod* — двумодальным, *asin* — арксинусным, *even* — равномерным, *trap* — трапециевидальным, *simp* — треугольным, *gaus* — нормальным, *lapl* — двусторонним экспоненциальным, *Kosh-C* — Коши, *binomial* — биномиальное) и несимметричными (*Kosh-L* и *Kosh-R* — левое и правое Коши, *Expn-L* и *Expn-R* — левое и правое экспоненциальное, *Bern-L* и *Bern-R* — левое и правое Бернулли, *Gamma-2* — гамма, *Poiss* — Пуассоновское, *Rele* — Рэлея) распределениями.

Во-вторых, эти сигналы подавались на вход цветового тестера, где формировались *RGB*-моды и цветовой код. В-третьих, в графическом пакете

Microsoft Paint в пункте меню «Изменение палитры» по измеренным значениям *RGB*-мод задавался соответствующий цвет и фиксировалась его яркостная характеристика.

Таким образом, была сформирована база данных (БД) цветовой палитры (табл. 1), дополненная названиями цветов (по субъективному восприятию человека с нормальным цветоощущением).

В-третьих, БД анализировалась с целью выявления латентных закономерностей своей структуры и интерпретировалась на предмет наличия «физического смысла» полученного классификационного построения.

Цветовая палитра распределений

№ п/п	Имя распределения	Компоненты цветового вектора			Цвет	Цветовой код	Яркость	Название цвета
		R	G	B				
1	Null	0	0	0		0	0	черный
2	2mod	255	0	255		16711900	120	розовый
3	asin	255	142	255		16748300	187	светло-розовый
4	even	255	255	255		16711700	240	белый
5	trap	172	255	172		11337600	201	зеленоватый
6	simp	103	255	103		6684520	168	бледно-зеленый
7	gaus	47	255	47		2752300	142	светло-зеленый
8	lapl	16	255	16		1113780	128	зеленый
9	Kosh -C	0	255	0		130816	120	ярко-зеленый
10	Kosh -R	0	0	255		255	120	ярко-синий
11	Kosh -L	255	0	0		16711700	120	ярко-красный
12	Expn-L	255	28	2		16719100	121	красный
13	Expn-R	4	35	255		203775	122	синий
14	Rele	255	203	33		16763200	136	желтый
15	Poiss	255	99	8		16732700	124	оранжевый
16	Gamma-2	255	65	4		16722700	122	ярко-оранжевый
17	binomial	155	255	155		8600000	193	бело-зеленый
18	Bern-R	110	0	255		6750460	120	светло-фиолетовый
19	Bern-L	255	0	110		16711800	120	красно-розовый

Результаты исследования. Конечный вариант анализа БД (табл. 1) представлен на рис. 2 в виде иерархической классификационной структуры с упорядоченным расположением распределений мгновенных значений случайных сигналов. Эталонные образцы сигналов обозначены цветными квадратами, подписанными сверху соответствующими именами распределений. В нижней части квадратов помещены значения цветовых мод в порядке следования.

Эталонные образцы сигналов расположились на особой плоскости, образованной координатами «яркость» (по оси ординат) и степени асимметрии (по оси абсцисс). Яркостная координата имеет минимум (0), соответствующий черному цвету (*Black*), который служит началом координат системы. Отметка максимальной яркости (240) задает уровень белого цвета, которому соответствует равномерное распределение *even* с координатами *RGB* (255, 255, 255). По обе стороны (вверх, вниз) от уровня белого цвета (*White*) яркость уменьшается. Оценка степени асимметрии проведена для гистограммы, ширина которой разбита на 9 интервалов группирования.

В целом расположение эталонных образцов представляет собой дерево, которое состоит из следующих элементов. Корень дерева образован черным квадратом. «Подземный» ствол содержит два квадрата (*2mod, asin*), соответствующих вогнутым распределениям. Белый цвет служит границей раздела между «подземной» и «надземной» частями структуры. Ствол дерева образуют эталонные образцы с симметричными распределениями (*trap, simp, gaus, lapl, Kosh-C*), цвет которых меняется от белого до ярко-зеленого в порядке уменьшения яркости. Крона классификационного дерева состоит из левой (*Bern-L, Kosh-L, Expn-L, Gamma-2, Poiss, Rele*) и правой (*Bern-R, Kosh-R, Expn-R*) ветвей, отображающих, соответственно, лево- и правоасимметричные распределения. Границей между ветвями служит симметричное (с нулевой степенью асимметрии) распределение *Kosh-C*, которое является самой верхней частью основного ствола. Меньшее количество эталонных образцов в правой ветви кроны объясняется отсутствием у авторов соответствующих программных генераторов сигналов. Однако и без этого на классификационной плоскости удалось разместить 18 реперных точек.

Алгоритм использования полученной структуры заключается в измерении *RGB*-мод анализируемого сигнала и интерполяции его положения на цветовой плоскости (рис. 2) с определением ближайших эталонов.

Заключение. Предлагаемая классификационная система позволяет разделять или группировать анализируемые сигналы как по форме РМЗ, так и по свойствам симметрии-асимметрии, выпуклости-вогнутости. Измеримость цветового дерева по осям координат (яркость-асимметрия) открывает возможности для автоматизации решения классификационных задач путем встраивания алгоритма анализа и БД (табл. 1) на программном уровне в микропроцессорные средства обработки сигналов. Таким образом, открывается новая перспектива создания интеллектуальных средств управления, измерения, контроля и диагностики.

С познавательной точки зрения, классификационная «цветовая» модель распределений может служить основой создания алгебры, как аналитического аппарата для анализа и прогнозирования результатов взаимодействия сигналов.

Библиографический список

1. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности : справ. изд. / Под ред. С. А. Айвазяна. — М. : Финансы и статистика, 1989. — 607 с.
2. Васильев, В. И. Распознающие системы / В. И. Васильев. — Киев : Наукова Думка, 1969. — 292 с.
3. Загоруйко, Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н. Г. Загоруйко. — Новосибирск : Изд-во ин-та математики им. С. А. Соболева СО РАН, 1999. — 270 с.
4. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений [Электронный ресурс] / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Журнал Радиоэлектроники. — 2006. — № 11. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 01.12.2014).
5. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Деп. в ВИНТИ, № 1540-B2006, Омский гос. техн. ун-т. — Омск, 2006. — 18 с.
6. Кликушин, Ю. Н. Идентификационные инструменты анализа и синтеза формы сигналов : моногр. / Ю. Н. Кликушин. — Омск : ОмГТУ, 2010. — 216 с.
7. Гуменюк, А. С. Алгоритмы анализа структуры сигналов и данных : моногр. / А. С. Гуменюк, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко [и др.]. — Омск : ОмГТУ, 2010. — 272 с.
8. Кобенко, В. Ю. Идентификационные измерения: методы, модели, технологии : моногр. / В. Ю. Кобенко. — Омск : ОмГТУ, 2014. — 208 с.
9. Кобенко, В. Ю. Фрактальная идентификационная шкала / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2009. — № 3 (83). — С. 205–213.
10. Кобенко, В. Ю. Фрактальная идентификационная плоскость Vz-метода / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 1 (87). — С. 213–223.
11. Кобенко, В. Ю. Определение диапазона идентификационной шкалы форм распределений / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 3 (123). — С. 235–240.
12. Кобенко, В. Ю. Операция сложения распределений сигналов в пространстве идентификационных чисел [Электронный ресурс] / В. Ю. Кобенко // Журнал Радиоэлектроники. — М. : ИРЭ РАН. — 2012. — № 4. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
13. Кобенко, В. Ю. Моделирование операции идентификационного сложения распределений случайных сигналов / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 2 (110). — С. 304–309.
14. Кобенко, В. Ю. Операция умножения распределений случайных сигналов в пространстве идентификационных чисел [Электронный ресурс] / В. Ю. Кобенко // Журнал Радиоэлектроники. — М. : ИРЭ РАН. — 2012. — № 3. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 15.06.2014).
15. Кобенко, В. Ю. Моделирование операции идентификационного умножения распределений случайных сигналов / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2012. — № 3 (113). — С. 302–305.
16. Кобенко, В. Ю. Операция умножения распределения случайного сигнала на число в пространстве идентификационных чисел / В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 1 (117). — С. 243–247.
17. Штейнберг, Ш. Е. Идентификация в системах управления / Ш. Е. Штейнберг. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 80 с.
18. Губарев, В. В. Классификационные измерения: методы и реализация / В. В. Губарев, А. А. Горшенков, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Автотметрия. — 2013. — № 2. — С. 76–84.
19. Кликушин, Ю. Н. Идентификационный способ классификации сигналов / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 267–272.

20. Кликушин, Ю. Н. Аналитическая интерполяция распределений в пространстве идентификационных шкал / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2013. — № 3. — С. 19–22.

21. Gorshenkov, A. A. Linguistic model for classification measurements of the distributions of signals / A. A. Gorshenkov, Yu. N. Klikushin, V. Yu. Kobenko // Measurement Techniques. — 2013. — Vol. 56. — № 1. — P. 31–36.

22. Koshekov, K. T. Fuel cell diagnostics using identification measurement theory [Text] / K. T. Koshekov, Yu. N. Klikushin, V. Yu. Kobenko, Yu. K. Evdokimov, A. V. Demyanenko // Journal of Fuel Cell Science and Technology. — 2014. — Vol. 11. — № 5. — С. 51003. — Режим доступа : <http://fuelcellscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleID=1861190> (дата обращения: 01.12.2014).

23. Кликушин, Ю. Н. Способ компьютерной диагностики болезни Паркинсона [Электронный ресурс] / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко // Журнал Радиоэлектроники. — 2012. — № 10. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 01.12.2014).

24. Захаренко, В. А. Технология классификации объектов диагностики с помощью МТШ-90 / В. А. Захаренко, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко, С. А. Орлов // Контроль. Диагностика. — 2012. — № 7. — С. 43–49.

25. Кобенко, В. Ю. Определение качества поверхности бумаги методом фрактального анализа / В. Ю. Кобенко, С. З. Ихлазов, А. В. Голунов // Омский научный вестник. Сер.

Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 3 (103). — С. 330–334.

26. Кликушин, Ю. Н. RGB — шкала для измерения распределений [Электронный ресурс] / Ю. Н. Кликушин // Журнал Радиоэлектроники. — 2008. — № 3. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 01.12.2014).

27. Кликушин, Ю. Н. «Цветовая» модель распределений [Электронный ресурс] / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко, А. С. Колмогоров // Журнал Радиоэлектроники. — 2011. — № 10. — Режим доступа : <http://jre.cplire.ru> (дата обращения: 01.12.2014).

КЛИКУШИН Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Технология электронной аппаратуры».

Адрес для переписки: iit@omgtu.ru

КОБЕНКО Вадим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Технология электронной аппаратуры».

Адрес для переписки: kobra_vad@rambler.ru

НОВИКОВ Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», секция «Информационно-измерительная техника».

Статья поступила в редакцию 10.12.2014 г.

© Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко, С. М. Новиков

УДК 621.396.962

**В. А. МАЙСТРЕНКО
Д. Д. ПРИВАЛОВ**

**Омский государственный
технический университет
Омский научно-исследовательский
институт приборостроения**

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ СИГНАЛОВ НА ВЫХОДЕ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ В ПРИСУТСТВИИ ПОМЕХИ

Проведен анализ динамической погрешности измерения разности фаз импульсных радиосигналов на выходе полосовых фильтров. Рассмотрено влияние аддитивного белого гауссова шума, а также аддитивной помехи на указанную погрешность. Установлена взаимосвязь отношения сигнал/помеха на выходе фильтра и погрешности измерения разности фаз.

Ключевые слова: разность фаз, динамическая погрешность, переходные процессы.

Постановка задачи. В связи с крайне высокой загруженностью электромагнитного пространства радиоэлектронными системами различного назначения в настоящее время очень важно точно выявлять наличие несанкционированных источников радиоизлучения (ИРИ) и определять их местоположение для эффективной борьбы с ними [1]. На первом этапе решения данных задач после обнаружения сигнала в заданном частотном диапазоне можно рассматривать определение направления на

ИРИ с нескольких точек пространства, т.е. в рамках задач пеленгации, которую возможно осуществить фазовым методом [2].

Одной из причин возникновения погрешности в определении направления на ИРИ является наличие переходных процессов в избирательных трактах системы при приеме импульсных радиосигналов. Разработке методов учета такой погрешности и ее исследованию посвящено большое количество работ [3–7]. Все они опираются либо

на приближенные методы расчетов, либо представляют собой громоздкие выражения, влекущие за собой чрезмерную трудоемкость. Стоит отметить, что трудность разработки точных подходов заключается в наличии колебательного процесса как во входном воздействии, так и в самой исследуемой системе, в качестве которой могут выступать полосовые фильтры. В качестве метода, не допускающего приближений, целесообразно использовать модифицированный метод быстрого обратного преобразования Лапласа, разработанный И. Д. Золотаревым [8].

Значительную погрешность в определении направления на ИРИ могут вносить помехи различной природы. В условиях сильно развитой инфраструктуры в пределах города неизбежно присутствие большого количества сигналов от систем связи. Кроме того, часто для подавления функционирования как указанных систем, так и систем мониторинга специально создают преднамеренные помехи [9].

В работе представлены результаты анализа динамической погрешности измерения разности фаз копий полезного сигнала на выходе полосовых фильтров как в присутствии аддитивного белого гауссова шума, так и при наличии отстроенной по частоте помехи.

Сигналы в каждом из приемных каналов являются копиями исходного сигнала, но с различной временной задержкой относительно начала излучения на передающей антенне ИРИ. При этом отличие данных задержек содержится в разности фаз принятых радиосигналов. Согласно такой постановке задачи искажения фазы из-за переходных процессов в каждом из фазовых каналов будут одинаковыми, но смещенными по времени. Этот факт с учетом динамического характера фазовых искажений не позволит скомпенсировать возникающей погрешности измеряемой разности фаз, которая также будет иметь сложную зависимость от времени [9–12].

Основные результаты. Были исследованы переходные процессы в простом колебательном контуре и фильтре на основе трех последовательно включенных колебательных контуров [13]. Передаточную характеристику первого фильтра запишем в виде:

$$k(p) = K_0 \frac{p + 2\alpha}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2}, \quad (1)$$

где K_0 — некоторый коэффициент, α — коэффициент затухания, равный половине полосы пропускания $\Delta\omega$, ω_0 — резонансная частота.

Для второго фильтра второе и третье колебательные звенья перестраиваются в область высоких и низких частот относительно резонансной частоты первого звена.

Крутизна склонов результирующей амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) повышается благодаря увеличению добротности расстроенных звеньев на определенные значения. АЧХ обоих фильтров с одинаковой полосой пропускания по уровню -3 дБ приведены для сравнения на рис. 1.

Передаточная характеристика данного фильтра равна произведению передаточных характеристик отдельных колебательных звеньев (1):

$$k(p) = K_0 \prod_{l=1}^3 \frac{p + 2\alpha_l}{(p + \alpha_l)^2 + \omega_{0,l}^2},$$

где коэффициенты затухания каждого из звеньев связаны соотношением $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_1/2$.

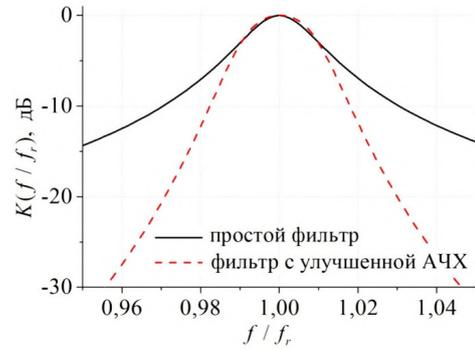


Рис. 1. Сравнение АЧХ фильтра с улучшенными характеристиками и АЧХ обычного колебательного контура

В качестве входного сигнала был использован радиосигнал с прямоугольной огибающей в виде:

$$\begin{aligned} x(t) &= X \sin(\omega_s t + \psi_s) [1(t) - 1(t - \tau_s)] = \\ &= x_0(t) - x_\tau(t), \end{aligned}$$

здесь X — амплитуда, ω_s — частота, ψ_s — начальная фаза, τ_s — длительность сигнала.

Используя метод быстрого обратного преобразования Лапласа (БОПЛА), реакцию простого колебательного контура можно записать в форме:

$$\Sigma(t) = y_0(t) - y_\tau(t) + z_0(t) - z_\tau(t) \quad (2)$$

$$y_0(t) = Y e^{j(\omega_s t + \beta)} 1(t), \quad y_\tau(t) = Y e^{j(\omega_s t + \beta)} 1(t - \tau_s),$$

$$z_0(t) = Z_0 e^{\alpha t} e^{j(\omega_0 t + \gamma_0)} 1(t),$$

$$z_\tau(t) = Z_\tau e^{\alpha(t - \tau_s)} e^{j(\omega_0(t - \tau_s) + \gamma_\tau)} 1(t - \tau_s),$$

где $Y = X |k(j\omega_s)|$, $\beta = \arg k(j\omega_s) + \psi_s - \frac{\pi}{2}$,

$$Z_0 = XK_0 \frac{(-\alpha + j\omega_0) \sin \psi_s + \omega_s \cos \psi_s}{(-\alpha + j\omega_0)^2 + \omega_s^2} \frac{\alpha + j\omega_0}{j\omega_0},$$

$$\gamma_0 = \arg Z_0,$$

$$Z_\tau = XK_0 \frac{(-\alpha + j\omega_0) \sin \psi_\tau + \omega_s \cos \psi_\tau}{(-\alpha + j\omega_0)^2 + \omega_s^2} \frac{\alpha + j\omega_0}{j\omega_0},$$

$$\gamma_\tau = \arg Z_\tau.$$

$\psi_\tau = \omega_s \tau_s + \psi_s$ — начальная фаза радиосигнала $x_\tau(t)$ в момент выключения входного радиосигнала $x(t)$, $\Sigma_{re}(t) = \text{Re}\{\Sigma(t)\}$.

Первые два слагаемых выражения (2) представляют собой вынужденную составляющую переходного процесса (ВСПП), определяемую возбуждающим сигналом, последние два слагаемых — свободную составляющую переходного процесса (ССПП), которая в основном зависит от характеристик исследуемого фильтра. При этом длительность переходного процесса t_{mn} определяется затуханием множителя $e^{\alpha t}$ в ССПП. Так как

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{2} = \frac{\omega_r}{2Q},$$

то t_{mn} характеризуется добротностью Q колебательного контура для данной ω_r .

Для фильтра с улучшенной АЧХ каждая составляющая выражения (2) примет вид:

$$y_0(t) = Y e^{j(\omega_s t + \beta)} 1(t), \quad y_\tau(t) = Y e^{j(\omega_s t + \beta)} 1(t - \tau_s),$$

$$z_0(t) = \sum_{l=1}^3 Z_{0,l} e^{\alpha_l t} e^{j(\omega_{0,l} t + \gamma_{0,l})} 1(t),$$

где

$$z_\tau(t) = \sum_{l=1}^3 Z_{\tau,l} e^{\alpha_l (t - \tau_s)} e^{j(\omega_{0,l} (t - \tau_s) + \gamma_{\tau,l})} 1(t - \tau_s),$$

$$Y = X |k(j\omega_s)|, \quad \beta = \arg k(j\omega_s) + \psi_s - \frac{\pi}{2}$$

$$Z_{0,l} = XK_0 \frac{(-\alpha_l + j\omega_{0,l}) \sin \psi_s + \omega_s \cos \psi_s}{(-\alpha_l + j\omega_{0,l})^2 + \omega_s^2} \times$$

$$\times \frac{\alpha_l + j\omega_{0,l}}{j\omega_{0,l}} \prod_{\substack{s=1 \\ s \neq l}}^3 \frac{-\alpha_l + j\omega_{0,l} + 2\alpha_s}{(\alpha_s - \alpha_l + j\omega_{0,l})^2 + \omega_{0,s}^2},$$

$$Z_{\tau,l} = XK_0 \frac{(-\alpha_l + j\omega_{0,l}) \sin \psi_\tau + \omega_s \cos \psi_\tau}{(-\alpha_l + j\omega_{0,l})^2 + \omega_s^2} \times$$

$$\times \frac{\alpha_l + j\omega_{0,l}}{j\omega_{0,l}} \prod_{\substack{s=1 \\ s \neq l}}^3 \frac{-\alpha_l + j\omega_{0,l} + 2\alpha_s}{(\alpha_s - \alpha_l + j\omega_{0,l})^2 + \omega_{0,s}^2},$$

$$\gamma_0 = \arg Z_0, \quad \gamma_\tau = \arg Z_\tau.$$

ССПП данного фильтра содержит три слагаемых с множителями $Z_l e^{\alpha_l t}$. Следовательно, t_{mn} зависит от добротностей каждого отдельного колебательного контура в составе фильтра.

Для расчетов были выбраны следующие параметры фильтров и входного сигнала: добротность параллельного колебательного контура $Q=50$, $\alpha_1 = \alpha$, $fr_1 = fr$, $fr_2 = 0,992 fr$, $fr_3 = 1,008 fr$, длительность радиосигнала $\tau_s / T = 100$, где T — его период.

Шумовая полоса второго фильтра получилась на 30 % меньше (190 кГц против 280 кГц для первого фильтра).

На рис. 2 представлены графики, характеризующие погрешность измерения разности фаз на выходе фильтров при наличии на входе аддитивной смеси полезного сигнала и белого гауссова шума. Для первого фильтра при входном отношении сигнал/шум h_n не менее 10 дБ, начиная от момента времени, соответствующего 40 периодам входного сигнала, и до конца существования этого сигнала погрешность не превышает 1,5 град., однако при уменьшении h_n погрешность начинает резко возрастать. Так, уже при $h_n = 0$ дБ она составляет более 4 град., а после выключения входного радиосигнала начинает резко возрастать. Для второго фильтра динамическая погрешность уменьшается по уровню по сравнению с простым полосовым фильтром. Для самого худшего случая уменьшение погрешности происходит примерно на 1 град., что объясняется уменьшением шумовой полосы фильтра.

В то же время отношение сигнал/шум h_{out} на выходе второго фильтра возрастает незначительно по сравнению с ранее рассмотренным фильтром (приблизительно на 26 дБ против 24 дБ) (рис. 3). Это означает, что измерения возможны лишь на интервале действия радиоимпульса с исключением некоторого начального интервала времени, в течение которого переходные процессы оказывают существенное влияние.

Картина существенно меняется, если одновременно с полезным сигналом действует отстроенная по частоте помеха.

Величину частотной отстройки можно определить по формуле:

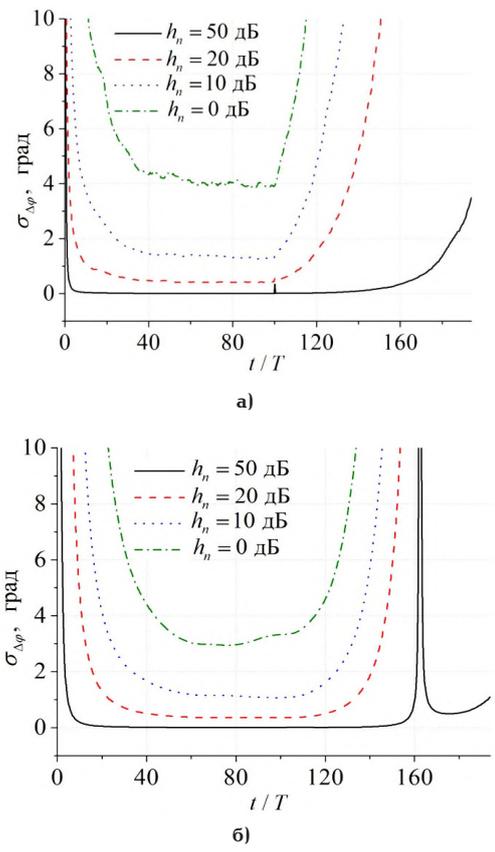


Рис. 2. Зависимость динамической погрешности измерения разности фаз сигналов от безразмерного времени при наличии аддитивного белого гауссова шума: а) первый фильтр; б) второй фильтр

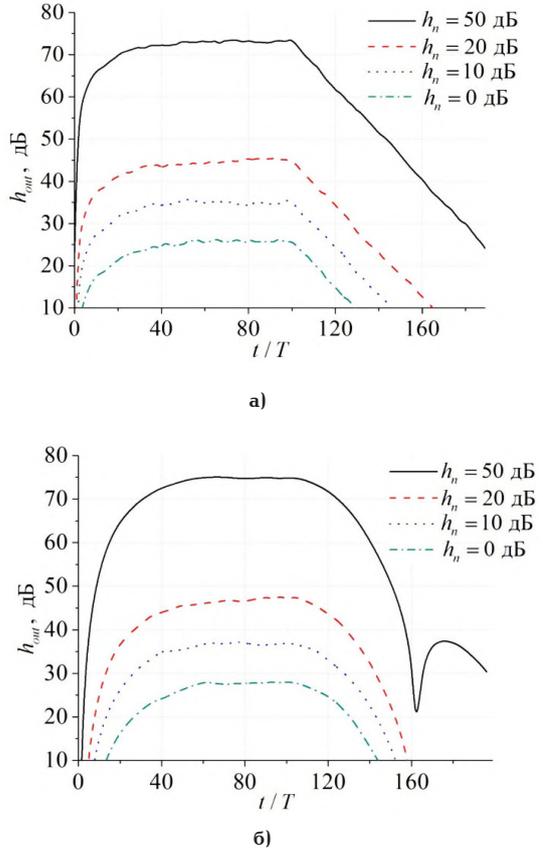


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе фильтра от безразмерного времени при различных значениях отношения сигнал/шум на входе: а) первый фильтр; б) второй фильтр

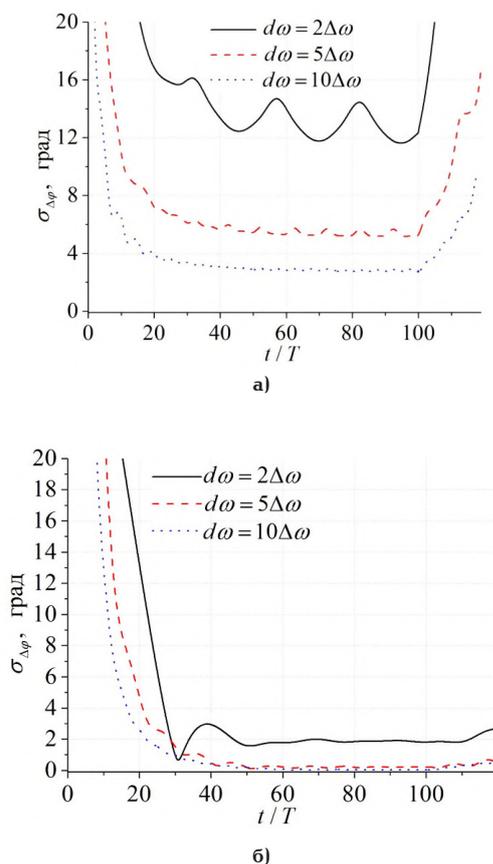


Рис. 4. Зависимость динамической погрешности измерения разности фаз от безразмерного времени в присутствии помехи: а) первый фильтр; б) второй фильтр

$$d\omega = \omega_i - \omega_c = k \Delta\omega,$$

где k принимается не менее двух, ω_i — частота помехи, ω_c — частота полезного сигнала. Мощности полезного сигнала и помехи принимаются равными.

Результаты измерения динамической погрешности для первого фильтра в указанной ситуации превышают 2 град даже при равных амплитудах сигнала и помехи и значительной отстройке по частоте (рис. 4). Это объясняется малым коэффициентом подавления в полосе задерживания. Кроме того погрешность претерпевает колебания во времени. В связи с тем, что второй фильтр обладает лучшими избирательными свойствами, отстроенная по частоте помеха будет оказывать значительно меньшее влияние на динамическую погрешность измерения разности фаз сигналов. При частоте помехи, отличной от частоты полезного сигнала на $2\Delta\omega$, исследуемая погрешность не превышает двух градусов к моменту окончания полезного сигнала, а при увеличении указанной отстройки погрешность уменьшается.

Если рассмотреть отношение сигнал/помеха на выходе фильтров, графики для которых представлены на рис. 5, то можно сделать вывод о том, что по мере затухания переходных процессов данное соотношение начинает увеличиваться, сначала имея колебательный характер, а затем принимая постоянное значение. Величина приращения отношения сигнал/помеха зависит от отстройки по частоте полезного сигнала и помехи, что определяется тем, на какой участок АЧХ фильтра попадает помеха. Необходимо отметить, что погрешность не превышает 2 град. при значениях сигнал/шум на выходе фильтра порядка 30 дБ и более.

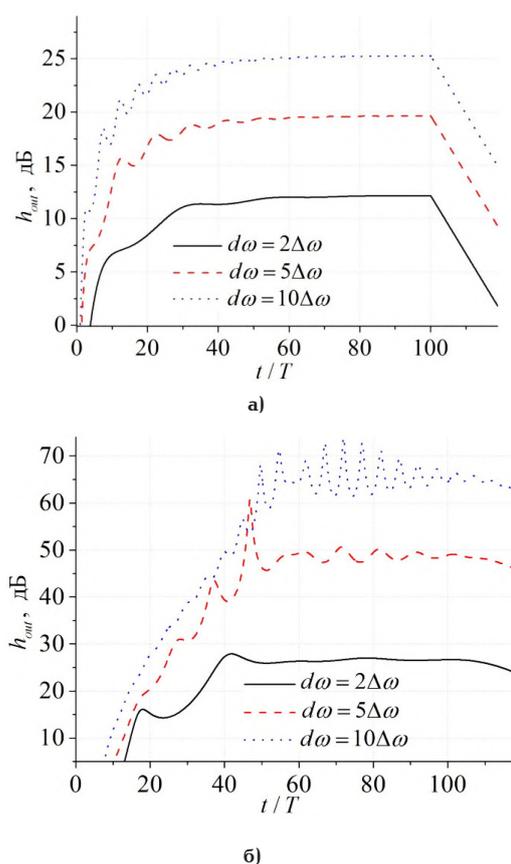


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/помеха на выходе фильтра от безразмерного времени: а) первый фильтр; б) второй фильтр

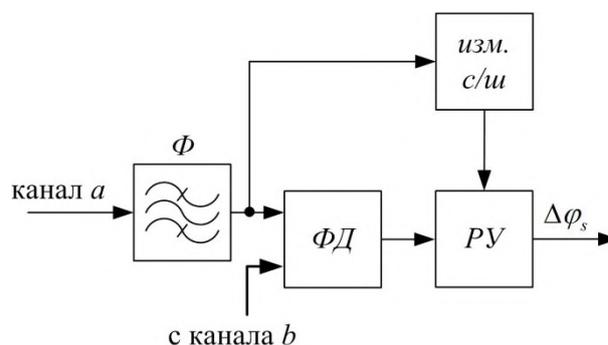


Рис. 6. Упрощенная структурная схема устройства измерения разности фаз в течение действия переходных процессов

Этот факт целесообразно использовать для определения времени начала фазовых измерений, как показано на рис. 6. Блок измерения с/ш отслеживает изменение отношения сигнал/помеха на выходе фильтра. Решающее устройство РУ по сигналу данного блока выдает команду разрешения съема данных с фазового дискриминатора ФД при превышении величины изменения отношения сигнал/шум больше заданного порога, который определяет погрешность измерения разности фаз. Это сразу позволяет исключить измерения, заведомо вносящие недопустимую погрешность, и начинать измерения, не дожидаясь полного окончания переходных процессов.

Выводы. Анализ переходных процессов, возникающих в фильтрах, на основе метода БОПЛ, а также определение их влияния на точность измерения

разности фаз с учетом воздействия внеполосной помехи выявил ряд закономерностей:

1. Простой колебательный контур обладает низкими фильтрующими свойствами, что приводит к возникновению значительных погрешностей в измерении разности фаз сигналов. В то же время применение трех последовательно включенных колебательных звеньев позволяет значительно улучшить фильтрующие свойства, что, в свою очередь, приводит к повышению точности фазовых измерений.

2. Наличие помехи оказывает решающее воздействие на точность измерения разности фаз. В данном случае динамическая погрешность сильно изменяется во времени и достигает минимальных значений в то время, когда превышение полезного сигнала над помехой на выходе фильтра достигнет значений 30 дБ и более.

3. Для уменьшения динамической погрешности измерения разности фаз, вызванной влиянием помехи, целесообразно использовать более узкополосные фильтры с коэффициентом прямоугольности, близким к единице. Однако нужно учитывать длительность полезного сигнала, с тем чтобы ССПП, возникающая в момент включения полезного сигнала, принимала незначительный уровень к моменту его выключения.

Полученные результаты позволяют обосновать целесообразность введения блока измерения отношения сигнал/шум на выходе фильтров, входящих в состав фазоизмерительных устройств, для повышения точности измерений и уменьшения времени определения направления на источники радиоизлучения в системах пеленгации и радиомониторинга.

Библиографический список

1. Рембовский, А. М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин ; под ред. А. М. Рембовского. — М. : Горячая линия — Телеком, 2006. — 492 с.
2. Космические радиотехнические комплексы / С. И. Бычков [и др.] ; под ред. С. И. Бычкова. — М. : Сов. Радио, 1967. — 582 с.
3. Гоноровский, И. С. Радиосигналы и переходные явления в радиоцепях / И. С. Гоноровский. — М. : Связьиздат, 1954. — 326 с.
4. Евтянов, С. И. Переходные процессы в приемно-усилительных схемах / С. И. Евтянов. — М. : Связьиздат, 1948. — 210 с.

5. Гарднер, М. Ф. Переходные процессы в линейных схемах с сосредоточенными постоянными / М. Ф. Гарднер, Дж. Л. Бэрнс ; пер. с англ. ; под ред. Г. И. Атабекова и Я. З. Ципкина. — М. : Физматгиз, 1961. — 251 с.

6. Алексеева, В. Г. Расчет формы сигналов / В. Г. Алексеева. — Л. : Энергия, 1968. — 296 с.

7. Arieh, L. Shenkman. Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook / L. Shenkman Arieh. — Netherlands : Springer, 2005. — 569 p.

8. Золотарев, И. Д. Исследование переходных процессов в колебательных системах и цепях / И. Д. Золотарев, Я. Э. Миллер. — М. : Радиотехника, 2010. — 304 с.

9. Цветнов, В. В. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Курьянов. — М. : МАИ, 1998. — 248 с.

10. Золотарев, И. Д. Анализ динамических режимов работы фазового пеленгатора при приеме фазоманипулированных сигналов без априорных данных о коде последовательности / И. Д. Золотарев, В. А. Березовский, Д. Д. Привалов, С. Н. Смалев // Успехи современной радиоэлектроники. — 2012. — № 11. — С. 50–57.

11. Привалов, Д. Д. Динамические режимы работы фазового пеленгатора с опорным каналом, функционирующего по наложенным сигналам / Д. Д. Привалов, В. А. Березовский, С. Н. Смалев // Радиотехника, электроника и связь (РЭС-2013) : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1–4 октября 2013 г. — Омск, 2013. — С. 240–249.

12. Шахильдян, В. В. Системы фазовой автоподстройки частоты / В. В. Шахильдян, А. А. Ляховкин. — М. : Связь, 1972. — 446 с.

13. Волин, М. Л. Усилители промежуточной частоты / М. Л. Волин. — М. : Сов. радио, 1956. — 232 с.

МАЙСТРЕНКО Василий Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета.

ПРИВАЛОВ Денис Дмитриевич, руководитель группы ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения».

Адрес для переписки: privalovdd.post@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14.01.2015 г.

© В. А. Майстренко, Д. Д. Привалов

Книжная полка

Лунин, Б. С. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : моногр. / Б. С. Лунин, В. А. Матвеев, М. А. Басараб. — М. : Радиотехника, 2014. — 176 с. — ISBN 978-5-88070-381-4.

Рассмотрены вопросы теории и моделирования волновых твердотельных гироскопов различной конфигурации. Затронуты аспекты, связанные с повышением точности, балансировкой ВТГ, освещены основные технологические процессы, используемые при их производстве. Показаны проблемы построения электроники и приведены методы обработки выходной информации.

Монография представляет интерес для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области проектирования и разработки гироскопов и гироскопических систем. Может быть полезна в качестве учебного пособия при изучении гироскопических систем студентами вузов.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДИАПАЗОНА ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН

Проводится анализ причин снижения показателей электромагнитной совместимости радиотехнических комплексов (РтК) диапазона декаметровых волн (ДкмВ) при оснащении радиоприемных центров из состава РтК средствами оперативного мониторинга гелио-, геофизических условий (ГфУ) распространения сигналов на ионосферных радиотрассах. Рассмотрены два варианта реализации ионозондов, обеспечивающие при их непосредственной работе в составе РтК снижение напряженности электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: радиотехнический комплекс, электромагнитная обстановка, эквивалентный одноканальный ЛЧМ-ионозонд, многоканальный ионозод.

Учет результатов оперативной оценки помеховой обстановки и оперативного мониторинга ГфУ распространения сигналов на ионосферных радиотрассах различной протяженности, полученных при непосредственной работе технических средств мониторинга (ионозондов) в составе РтК диапазона ДкмВ (систем радиосвязи, океанографических радаров, систем загоризонтной радиолокации), обеспечивает существенное повышение надежности функционирования РтК [1 – 3].

Однако работа ионозонда в составе радиоприемного центра (РпЦ) РтК (как источника непреднамеренных электромагнитных помех — НЭМП с мощностью сигнала на выходе радиопередатчика $P_T \leq 40$ кВт) приводит к резкому увеличению напряженности электромагнитной обстановки (ЭМО) РпЦ и фактически к полному блокированию штатной работы РтК в моменты излучения зондирующих сигналов [1, 4, 5].

Цель работы — разработка методов снижения напряженности ЭМО радиоприемных центров радиотехнических комплексов диапазона ДкмВ при воздействии непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП) от радиопередатчиков ионозондов при их непосредственной работе в составе РтК.

По методике, изложенной в [3, 6], была проведена оценка ЭМО РтК радиосвязи диапазона ДкмВ, содержащего в своем составе ионозонд с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-ионозонд) с мощностью сигнала на выходе радиопередатчика ЛЧМ-ионозонда $P_T \leq 10$ Вт. Результаты оценки показали, что для одновременной работы ЛЧМ-ионозонда в штатном режиме и радиоприемных устройств (РпУ) из состава РпЦ необходимо разнесение на местности передающей антенны ЛЧМ-ионозонда (как источника НЭМП) и антенн РпЦ на расстояние $r_{\text{ном}} \geq 45$ км. Такое расстояние разнесения технических средств РтК значительно превышает возможности внутриузловой связи комплекса, составляющего для равнинного рельефа местности величину (5...9) км [6]. Кроме того, при таких мощностях P_T радиопередатчика ЛЧМ-ионозонда функционирование средств оперативного мониторинга

в режиме возвратно-наклонного зондирования на ионосферных радиотрассах протяженностью $\geq (1,5...3,5)$ Мм характеризуется низкой результативностью, обусловленной низким отношением «сигнал / шум + помеха» на входе РпУ ЛЧМ-ионозонда. Попытка повысить результативность оперативного мониторинга ГфУ в режиме возвратно-наклонного зондирования путем увеличения мощности излучаемого ЛЧМ-сигнала и (или) увеличения длительности интервала зондирования [1] приводит к ещё большему возрастанию напряженности ЭМО РпЦ радиотехнических комплексов вследствие:

— существенного увеличения относительного уровня гармонических составляющих ЛЧМ-сигнала (второй и особенно третьей гармонических составляющих) на выходе усилителя мощности тракта передачи ЛЧМ-ионозонда (при увеличении мощности ЛЧМ-сигнала от $P_T \leq 10$ Вт до $P_T = (200...1000)$ Вт уровень третьей гармонической составляющей на выходе усилителя мощности изменяется от величины минус 45 дБ до величины минус (15...13) дБ соответственно [3]);

— более высокого значения коэффициента полезного действия приемных и передающих антенн диапазонов гектометровых волн (2,0...3,0) МГц и ДкмВ на частотах второй и особенно третьей гармонических составляющих излучаемого ЛЧМ-сигнала, что приводит к пропорциональному увеличению уровней НЭМП на входах РпУ из состава РпЦ и вследствие этого к снижению реальной чувствительности РпУ (РпУ ЛЧМ-ионозонда — в том числе);

— увеличения длительности сеанса излучения зондирующего ЛЧМ-сигнала (для диапазона рабочих частот ЛЧМ-ионозонда (2,0...30,0) МГц) до 24-х минут при скорости изменения частоты 20 кГц/с, и до 47 минут при скорости изменения частоты 10 кГц/с.

Перспективным направлением разработки, обеспечивающим повышение технико-экономических показателей РтК, является распараллеливание процессов обработки сигналов как на физическом, так и на программном уровнях [7, 8]. Возможность

использования этого направления для решения поставленной задачи следует из анализа стандартного алгоритма обработки отраженного от ионосферы ЛЧМ-сигнала (блоки подпрограмм «Ввод данных» и «БПФ» в РПУ из состава пакета прикладных программ ЛЧМ-ионозонда [1]). Поступающий в РПУ ЛЧМ-сигнал преобразуется в низкочастотный сигнал разностной частоты, который затем оцифровывается и разбивается на примыкающие n элементов ($n \geq 512$) длительностью T_3 каждый ($T_3 \ll T_2$; T_2 — длительность зондирующего ЛЧМ-сигнала). Отсчеты сигнала каждого из элементов длительностью T_3 (по мере их поступления) обрабатываются в процессорном модуле с учетом того, что средняя (рабочая) частота сигнала в пределах каждого из n элементов длительностью T_3 меняется по линейному закону [1, 2, 9].

Первый вариант модернизации стандартного ЛЧМ-ионозонда [1, 9] предполагает разбиение непрерывного зондирующего ЛЧМ-сигнала длительностью T_2 на M примыкающих интервалов времени длительностью $T_1 = (T_2/M)$ каждый, **одновременное** (параллельное) излучение всех M парциальных элементов зондирующего ЛЧМ-сигнала на интервале времени $T_1 < T_2$ в соответствующем поддиапазоне рабочих частот $\Delta f_1 = \Delta f_M = (\Delta F/M)$ МГц; $\{\Delta F = f_{\max} - f_{\min}; [MГц] f_{\min}; f_{\max}$ — минимальное и максимальное значения рабочих частот ЛЧМ-ионозонда} и одновременный прием на интервале времени $T_1 < T_2$ отраженных от ионосферы M парциальных независимых элементов ЛЧМ-сигнала с помощью M -канального РПУ ионозонда. Такое построение ионозонда обеспечивает уменьшение в (T_2/T_1) раз времени зондирования по сравнению с эквивалентным одноканальным ионозондом и, следовательно, снижение напряженности ЭМО РтК. При этом в каждом из M парциальных параллельно работающих каналов РПУ ионозонда, так же, как и в одноканальном эквивалентном ЛЧМ-ионозонде, осуществляется разбиение элемента поступившего сигнала длительностью T_1 на примыкающие n интервалов длительностью T_3 ($T_3 \ll T_1$) с последующей цифровой обработкой, определяемой пакетом прикладных программ многоканального (M -канального) РПУ ионозонда [1, 8, 9]. Выбор значения M (с учетом диапазона рабочих частот, значения минимальной частоты первого поддиапазона ионозонда, и т.д.) обеспечивает снижения уровней вторых и третьих гармонических составляющих излучаемых парциальных ЛЧМ-сигналов, что также способствует снижению напряженности ЭМО РтК.

Рассмотрим особенности реализации M -канального ионозонда.

На рис. 1 приведена функциональная схема ионозонда, где обозначено: 1 — тракт передачи; 2 — тракт приема; 3 — контроллер; 4 — автоматизированное рабочее место оператора (на основе ПЭВМ); 5 — блок синхронизации [1, 9].

Тракт передачи 1 содержит последовательно соединенные блок управления и формирования; усилитель мощности 7; согласующее устройство (СУ) 8; передающую антенну 9. Тракт приема 2 содержит последовательно соединенные приемную антенну 10 и радиоприемное устройство отраженного от ионосферы сигнала 11. На рис. 2 показана функциональная схема варианта построения согласующего устройства 8 из состава тракта передачи M -канального ионозонда, где обозначено: $12_1, \dots, 12_M$ — M полосно-пропускающих фильтров — ПпФ

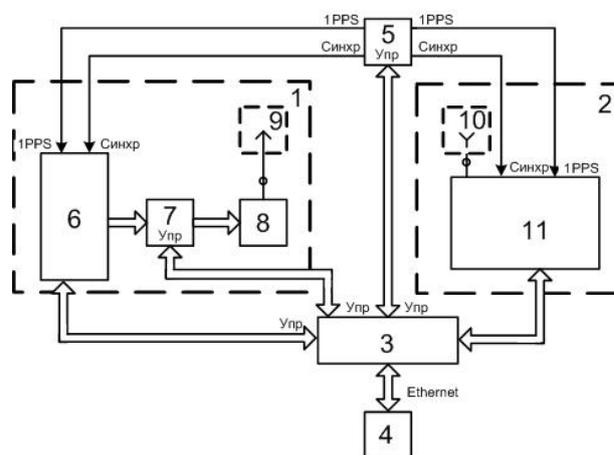


Рис. 1. Функциональная схема ионозонда

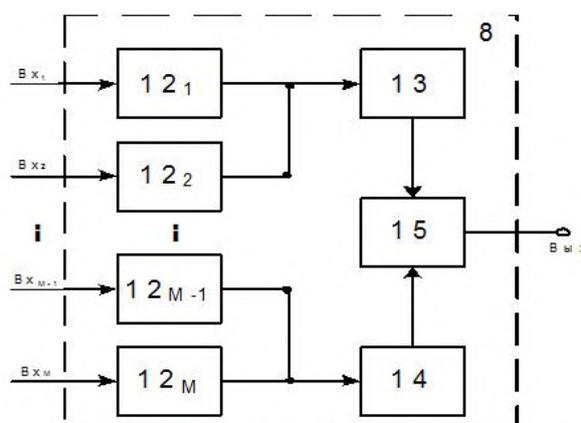


Рис. 2. Функциональная схема варианта согласующего устройства

(постселекторов); 13, 14 — первый и второй компенсирующие двухполюсники; 15 — мостовой сумматор.

В предлагаемом устройстве ЛЧМ-синтезатор из состава блока управления и формирования, усилитель мощности и высокочастотный тракт из состава РПУ тракта приема выполнены M -канальными ($M \geq 3$). Выходы парциальных каналов ЛЧМ-синтезатора через M входов-выходов независимых каналов усилителя мощности соединены с соответствующими M входами СУ. Каждый из входов СУ является входом одного из M ПпФ с фиксированным значением полосы пропускания, объединенных по выходам в две группы, при этом каждая группа ПпФ объединяет полосовые фильтры с несмежными полосами пропускания [10, 11].

Величина M определяется из условия подавления третьих гармонических составляющих в суммарном сигнале тракта передачи ЛЧМ-ионозонда. Для значения коэффициента перекрытия по частоте первого варианта M -канального ионозонда $k_F = (f_{\max}/f_{\min}) = 15$ (диапазон рабочих частот $f_{\min} = 2,0$ МГц; $3f_{\min} = 6,0$ МГц; $f_{\max} = 30,0$ МГц) и реализации в каждом из парциальных каналов линейного закона частотной модуляции с определенным значением скорости изменения частоты F' парциальных зондирующих сигналов величина M принимает значение $M \geq 7$. Минимальное количество элементов в схемах компенсирующих

двухполюсников и мостового сумматора из состава СУ получается при четном значении M [10, 11]. С учетом этого примем $M = 8$, что для принятого диапазона рабочих частот обеспечивает значения частотных полос первого Δf_1 и последующих парциальных поддиапазонов M -канального ионозонда значение $\Delta f_1 = 3,5$ МГц. Такое разбиение диапазона рабочих частот M -канального ионозонда обеспечит гарантированную фильтрацию гармонических составляющих каждого из восьми парциальных элементов излучаемого зондирующего сигнала.

Относительный уровень третьих гармонических составляющих парциальных сигналов на выходе СУ тракта передачи из состава ионозонда (при равенстве мощностей сигналов на выходах парциальных трактов усиления и норме подавления уровня третьей и последующих гармонических составляющих на выходе парциальных трактов усиления радиопередающих устройств \geq минус 70 дБ [3]) не превысит значения минус 88 дБ. Такое значение ослабления третьих гармонических составляющих парциальных сигналов может быть достигнуто реализацией ПпФ не выше шестого порядка. Следует добавить, что увеличение отношения «сигнал/помеха» в нижней части диапазона рабочих частот ионозонда может быть достигнуто вариацией мощностей сигналов на выходах усилителей парциальных поддиапазонов с учетом значений коэффициентов полезного действия передающей и приемной антенн ионозонда.

Дополнительное снижение напряженности ЭМО при использовании предлагаемого ионозонда в составе РтК достигается за счет бланкирования (существенного уменьшения мощности) излучаемых парциальных ЛЧМ-сигналов на выходе тракта передачи:

- для значений рабочих частот основных каналов приема РПУ из состава РпЦ;

- для значений запрещенных по международным соглашениям частот бедствия и служб безопасности, стандартов частоты и службы единого времени, радиоастрономической службы и т.д. [12].

Бланкирование (существенное уменьшение в парциальном канале усиления уровней ЛЧМ-сигналов до величины минус 160 дБ относительно номинальных значений [3]) при достижении значений бланкируемых частот в каждом из парциальных каналов производится плавно (передний и задний фронты бланкирующего импульса изменяются по синусоидальному закону). Это обеспечивает минимизацию помех переходного процесса бланкирования и незначительное влияние процесса бланкирования на характеристики ионозонда. Значения запрещенных по международным соглашениям частот, значения рабочих частот основных

каналов приема РПУ из состава РпЦ и время их использования согласно долговременного графика работы РпЦ, вводятся в ПЭВМ автоматизированного рабочего места оператором перед началом работы при составлении графика работы РтК.

Результаты оценки ЭМО РтК при использовании предлагаемого многоканального ионозонда показали, что необходимое расстояние разнесения на местности между антеннами ионозонда и антеннами РпЦ принимает значение $r_{\text{пом}} \geq 0,5$ км.

Второй вариант модернизации M -канального ионозонда может быть реализован разбиением диапазона рабочих частот по принципу «равных парциальных коэффициентов перекрытия по частоте k_{FM} ».

Этот вариант обеспечивает значительное повышение технико-экономических показателей многоканального ионозонда по сравнению с рассмотренным выше вариантом. Значение k_{FM} для такого разбиения диапазона рабочих частот ионозонда определяется выражением:

$$k_{FM} = 10^{[(\lg k_F) / M]}, \quad (1)$$

где $k_F = (f_{\text{макс}} / f_{\text{мин}})$; M — количество парциальных каналов ($M \geq 3$).

Следует отметить, что для данного варианта разбиения в СУ минимизируется отклонение выходных сопротивлений каждой из групп ПпФ, что обеспечивает в диапазоне рабочих частот отклонение выходных сопротивлений каждой из групп фильтров в пределах (± 5)% от величины заданного значения сопротивления. Это гарантирует минимальные энергетические потери парциальных зондирующих сигналов [11].

Для исходных данных: $f_{\text{мин}} = 2,0$ МГц; $f_{\text{макс}} = 30,0$ МГц; $k_F = 15$; $M \in (3..8)$ в табл. 1 приведены значения k_{FM} и соответствующие им значения граничных частот парциальных частотных поддиапазонов $\{f_1; f_2; f_{M-2}; f_{M-1}\}$.

В качестве примера на рис. 3а для значения $M = 4$ показаны графики изменения частот в поддиапазонах излучаемых парциальных сигналов многоканального ионозонда. На рис. 3б показан график изменения частоты зондирующего сигнала эквивалентного одноканального ионозонда при условии равенства частот в узлах сопряжения, обозначенных на рисунке цифрами $\{1, 2, 3\}$, и соответствующие координаты положения этих узлов сопряжения на графике на оси времени $t \{T_1, T_2 = 2T_1, T_3 = 3T_1\}$. Для случая $M = 4$ величина T_{Σ} эквивалентного интервала времени излучения зондирующего сигнала, определяющего его эффективность, принимает значение $T_{\Sigma} = 4T_1$.

Таблица 1

M	k_{FM}	f_1 , МГц	f_2 , МГц	f_{M-2} , МГц	f_{M-1} , МГц
3	2,466	4,932	—	—	12,162
4	1,968	3,936	7,746	—	15,244
5	1,718	3,436	5,903	10,141	17,423
6	1,570	3,140	4,929	12,163	19,077
7	1,472	2,944	4,333	13,822	21,345
8	1,402	2,804	3,931	15,188	21,294

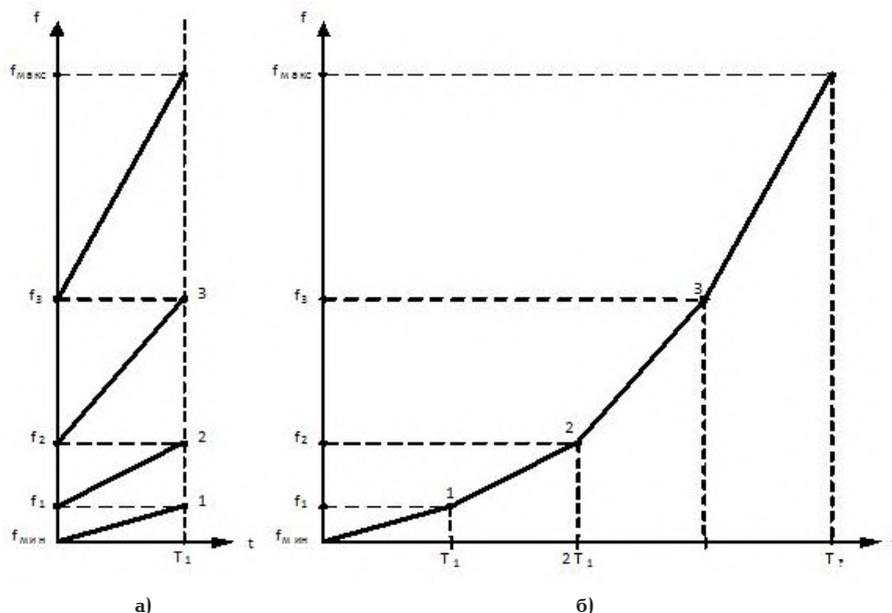


Рис. 3. Графики изменения частот зондирующих сигналов многоканального а) и эквивалентного одноканального б) ионозондов

Длительность интервала излучения $T_1 < T_2$ зондирующего сигнала многоканального ионозонда определяется выражением:

$$T_1 = \Delta f_{\text{макс}} / F', \quad (2)$$

где $\Delta f_{\text{макс}} = (f_{\text{макс}} - f_{M-1})$; $F'_{\text{макс}}$ — максимальная скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала на интервале времени $t \in (T_{M-1} \dots T_2)$ излучения эквивалентного одноканального ионозонда.

Значение $F'_{\text{макс}}$ может быть выбрано из стандартного ряда скоростей изменения частоты $F'_{\text{макс}} \in \{50 \text{ кГц/сек}; 100 \text{ кГц/сек}; \dots\}$.

Ломаная кривая, представленная на рис. 3б, в узлах сопряжения достаточно точно совпадает с нормированным графиком квадратичного закона изменения частоты зондирующего сигнала — КЧМ-сигналом [13] для случая равенства исходных частот $f_{\text{мин}}$ и $f_{\text{макс}}$. При этом погрешность расхождения значений частот КЧМ-сигнала и аппроксимирующей ломаной кривой, изображенной на рис. 3б, в узлах сопряжения не превышает 20%. Характеристики зондирующего КЧМ-сигнала рассмотрены в [13, 14], где показано, что функция неопределенности КЧМ-сигнала приближается к идеальной («кнопочной» [14]) функции неопределенности с минимальным уровнем боковых лепестков. Зондирующие сигналы, характеризующиеся такой функцией неопределенности, обеспечивают при прочих равных условиях предельно достижимую разрешающую способность по дальности (и, соответственно, по времени) [13, с. 93].

Заключение

1. Включение в состав РтК диапазона ДкМВ технических средств оперативного мониторинга ГФУ распространения сигналов на ионосферных радиотрассах (ионозондов) обуславливает необходимость разнесения на местности передающей антенны ЛЧМ-ионозонда (как источника НЭМП) и антенн РпЦ на расстояние $r_{\text{пом}} \geq 45 \text{ км}$.

2. Рассмотрены два варианта построения ионозондов, обеспечивающих при мощностях излучаемого зондирующего сигнала $P_T = (200 \dots 1000) \text{ Вт}$ подавление уровней третьих (наиболее опасных)

гармоник излучаемых парциальных зондирующих сигналов до значений минус 88 дБ и более относительно пикового уровня выходного сигнала тракта передачи ионозонда.

3. Использование бланкирования запрещенных частот обеспечивает выполнение условий электромагнитной совместимости технических средств РпЦ и многоканального ионозонда при разнесении на местности передающей антенны ионозонда и приемных антенн РпЦ на расстояние $r_{\text{пом}} \geq 0,5 \text{ км}$.

Библиографический список

1. Иванов, В. А. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Шумаев; под ред. В. А. Иванова. Йошкар-Ола: Мар ГТУ, 1998. — 204 с.
2. Рябова, Н. В. Исследование надежности декаметровых систем связи на трассах протяженностью 2,6 – 5,7 Мм на основе данных панорамного зондирования ионосферных радиолиний: в 3 т. / Н. В. Рябова, М. И. Бастракова, А. В. Мальцев // Радиолокация. Навигация. Связь: сб. докл. XIII Междунар. науч.-технич. конф. «RLNC 2007», 17–19 апреля 2007 г. — Воронеж: НПФ «Саквоее» ООО, 2007. — Т. 2. — С. 1187–1196. — ISBN 978–5–9900659–2–5.
3. Березовский, В. А. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / В. А. Березовский, И. В. Дулькейт, О. К. Савицкий. — М.: Радиотехника, 2011. — 444 с.
4. Пат. 132 285 РФ, МПК Н 04 В 7/00 (2006.01). Многоцелевой автоматизированный приемопередающий узел радиосвязи // Шадрин Б. Г., Будяк В. С.; заявитель и патентообладатель ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения». № 2013 107518/07; заявл. 20. 02. 2013; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. — 2 с.
5. Будяк, В. С. Практические аспекты разработки автоматизированных модульных узлов радиосвязи: в 3 т. / В. С. Будяк, Б. Г. Шадрин // Радиолокация. Навигация. Связь: сб. докл. XX Междунар. науч.-технич. конф. «RLNC 2014», 15–17 апреля 2014 г. — Воронеж: ИНПФ «Саквоее» ООО, 2014. — Т. 3. — С. 2044–2050. ISBN 978–5–904259–22–8.
6. Будяк, В. С. Электромагнитная обстановки автоматизированных модульных узлов радиосвязи / В. С. Будяк, Д. В. Сидоров, Т. Б. Клименко // Омский научный вестник.

Сер. Приборы, машины и технологии. — 2014. — № 1 (127). — С. 201–205. — ISSN 1813–8225.

7. Чельшев, В. Д. «Умное радио» парадигмы структуризации физического уровня / В. Д. Чельшев // Радиотехника, электроника и связь : сб. докл. Междунар. науч.-технич. конф. «РЭС 2011», 5–8 июля 2011 г. — Омск : Радиотехника, 2011. С. 46–53. — ISBN 978 5–88070–297–8.

8. Зубков, М. П. Применение программно-аппаратной архитектуры параллельных вычислений CUDA для решения задач цифровой обработки сигналов / М. П. Зубков, С. Ю. Лобачева // Техника радиосвязи : науч.-техн. сб. — Омск : ОНИИП, 2013. — Вып. 2 (20). — С. 47–53. ISSN 2075-8963.

9. Иванов, В. А. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами / В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова // Вестник МарГТУ, 2010. № 1. — С. 3–37. — ISSN 1997-4655.

10. Алексеев, О. В. Многоканальные частотно-разделительные устройства и их применение / О. В. Алексеев, Г. А. Грошев, Г. Г. Чавка. М. : Радио и связь, 1981. 136 с.

11. Зиновьев, А. Г. Расчет многоканальных частотно-разделительных устройств фильтрового типа / А. Г. Зиновьев // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. М. : ЦООНТИ «ЭКОС», 1986. — Вып. 6. — С. 49–55.

12. Свешников, Ю. К. Общие принципы построения сети ЛЧМ зондов / Ю. К. Свешников // Техника радиосвязи. — Омск : ОНИИП, 2004. — Вып. 9. — С. 61–68. ISSN 2075-8963.

13. Варакин, Л. Е. Теория сложных сигналов / Л. Е. Варакин. — М. : Советское радио, 1970. 376 с.

14. Кук, Ч. Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд ; пер. с англ. под ред. В. С. Кельзона. — М. : Советское радио, 1971. 568 с.

БУДЯК Владимир Серафимович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.
Адрес для переписки: 1149@oniip.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2014 г.

© В. С. Будяк

УДК 621.396.662.2

Д. А. БОРЕЙКО

Омский государственный
технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТИВНОСТЕЙ В ВИДЕ 3D П-ОБРАЗНОЙ СПИРАЛИ С РАЗЛИЧНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕКРЫТИЯ ВИТКОВ

Рассмотрены вопросы построения многослойных интегральных катушек индуктивности. Проведен сравнительный анализ конструкций индуктивностей в виде 3D П-образной спирали с различным коэффициентом перекрытия витков и определена конструкция с сочетанием высоких электрических характеристик и минимальных габаритных размеров. Указана область возможного применения данной конструкции. Обозначено направление для дальнейших исследований в обозначенной области.

Ключевые слова: интегрированные элементы, многослойные индуктивности, электромагнитное моделирование, добротность.

В современных условиях существует необходимость освоения СВЧ-диапазона, при этом перспективным является направление, основанное на использовании многослойных интегральных структур [1]. При проектировании частотно зависимых многослойных интегральных устройств особое внимание уделяется индуктивностям, так как они имеют крайне низкие значения добротности по сравнению с другими элементами.

Стоит отметить, что существует большое количество конструкций многослойных интегральных индуктивностей, что ставит сложную задачу по выбору той конструкции, которая будет иметь высокие электрические характеристики при минимальных габаритных размерах.

В литературе описано большое количество конструкций многослойных интегральных катушек индуктивности, а также указаны те конструктивные параметры, которые влияют на электрические ха-

рактеристики [2, 3]. Однако эти зависимости даны неявно и не могут служить основой для осуществления выбора топологии слоев.

В связи с этим ранее нами был проведен анализ конструкций многослойных интегральных индуктивностей [4, 5], в ходе которого в расчет бралась ширина проводника, внутренний диаметр, а также учитывалось влияние выборки во внешнем заземленном экране. По результатам исследования лучшим сочетанием электрических и конструктивных параметров обладает индуктивность в виде сужающейся 3D П-образной спирали.

Однако для указанной конструкции остается не изученным влияние на электрические характеристики такого показателя, как степень перекрытия витков на разных слоях. Данный показатель сказывается на количестве слоев и на занимаемой площади, что обуславливает его значимость для обеспечения высокого уровня интеграции.

Перекрытие витков является причиной наличия паразитной межслойной емкости, но, в то же время, создает дополнительную индуктивность за счет магнитной связи.

Общую индуктивность L такой конструкции можно посчитать с использованием формул (1, 2), приведенных в [3].

$$L = L_1 + L_2 + 2M, \quad (1)$$

где L_1, L_2 — номиналы индуктивности витков катушки,

M — взаимная индуктивность.

$$M = k\sqrt{L_1L_2}, \quad (2)$$

где k — коэффициент связи между спиралями.

Отсутствие перекрытия витков позволяет уменьшить паразитную межслойную емкость, с другой стороны, полное перекрытие витков соответствует максимальному значению взаимной индуктивности витков. Таким образом, существует необходимость в исследовании для 3D П-образной индуктивности зависимости электрических характеристик от степени перекрытия витков.

Для оценки степени перекрытия витков необходимо ввести соответствующий коэффициент t , который может быть рассчитан по формуле (3):

$$t = \frac{P}{S} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где P — ширина перекрываемого участка,

S — ширина витка.

При исследовании указанных индуктивностей изменялось только количество слоев, в которых реализована катушка.

В ходе сравнения определялась конструкция, обладающая лучшим сочетанием электрических и конструктивных характеристик. Также, для оценки возможностей по практическому применению, было проведено сравнение индуктивностей разных конструктивных исполнений, реализованных в одном количестве слоев и с одинаковыми геометрическими параметрами.

Диапазон значений наиболее применяемых интегральных многослойных индуктивностей от 5 до 200 нГн, в связи с чем для исследования был выбран ряд номиналов из указанного диапазона.

Постоянные параметры геометрии конструкции и топологии слоев:

- ширина проводника — 200 мкм;
- ширина зазора — 200 мкм;
- диаметр переходного отверстия — 100 мкм;
- длина стороны большего витка спирали выбиралась на основании предварительного моделирования:
 - для 5 нГн — 1,6 мм,
 - для 10 нГн — 2,0 мм,
 - для 25 нГн — 3,0 мм,
 - для 50 нГн — 3,4 мм,
 - для 100 нГн — 4,4 мм,
 - для 200 нГн — 6,0 мм;
- количество слоев от крайних витков до заземленных экранов — 2;

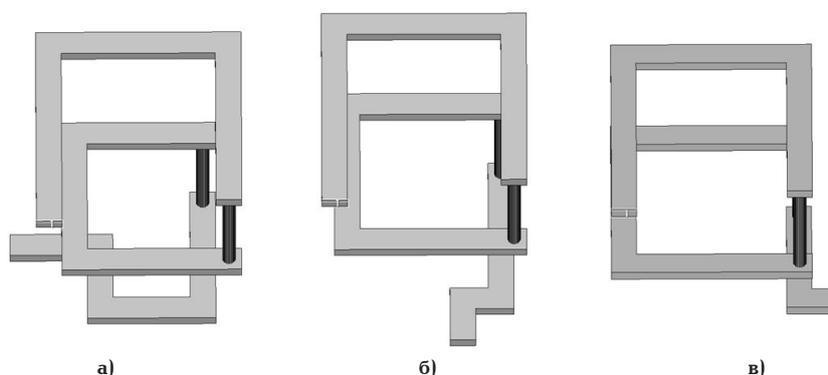


Рис. 1. Модель 3D П-образной индуктивности с коэффициентом перекрытия витков 0 % а), 50 % б) и 100 % в)

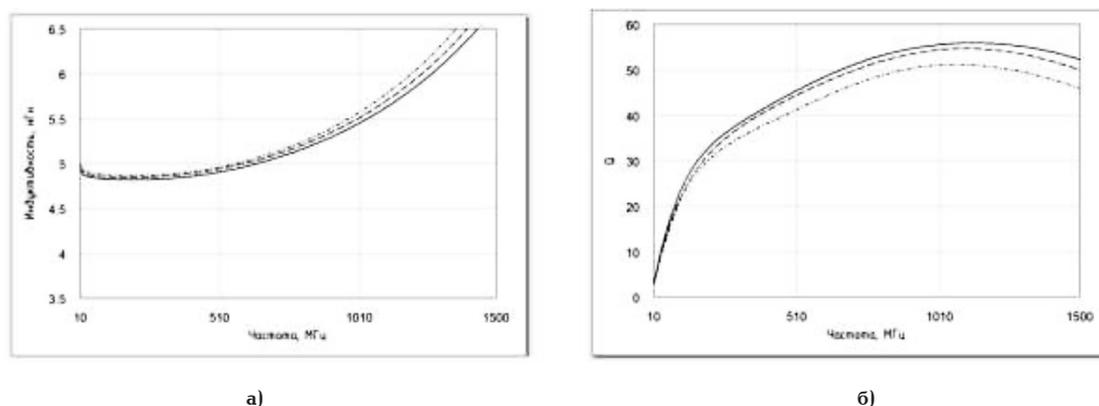


Рис. 2. График зависимости индуктивности а) и добротности б) от частоты для 3D П-образной индуктивности 5 нГн с коэффициентом перекрытия витков:
 0 %, ----- 50 %, ————— 100 %

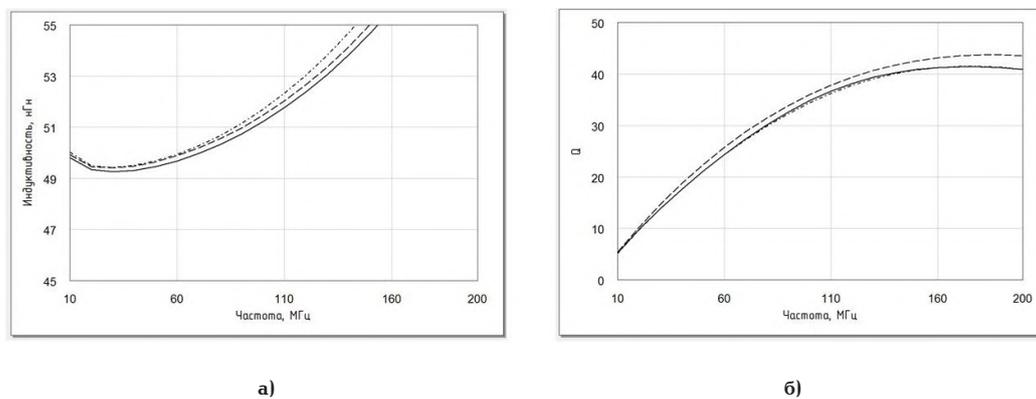


Рис. 3. График зависимости индуктивности а) и добротности б) от частоты для 3D П-образной индуктивности 50 нГн с коэффициентом перекрытия витков:

— ······ 0 %, — — — — — 50 %, ————— 100 %

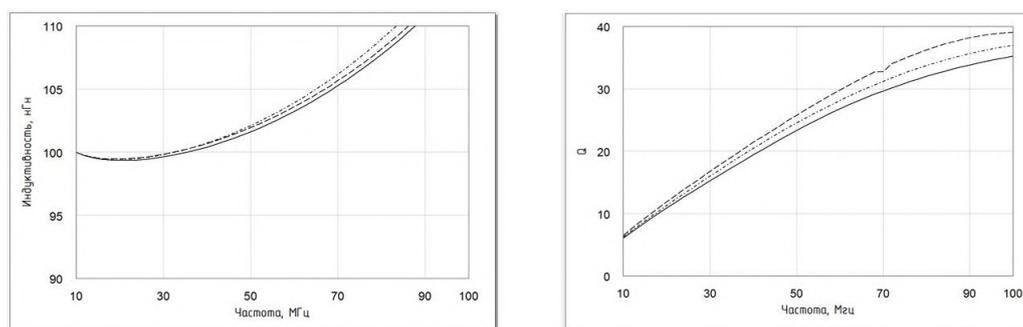


Рис. 4. График зависимости индуктивности а) и добротности б) от частоты для 3D П-образной индуктивности 100 нГн с коэффициентом перекрытия витков:

— ······ 0 %, — — — — — 50 %, ————— 100 %

— расстояние от внешнего контура до краев подложки — 200 мкм.

Ряд значений коэффициента t — 0 %, 50 %, 100 %.

При сравнении катушек, реализованных в одном количестве слоев (5 слоев) длина стороны большего витка бралась равной 1,6 мм.

Ввиду трудоемкости аналитических расчетов для многослойных планарных индуктивностей и их низкой точности целесообразно использовать численные методы, по этой причине использовалось электромагнитное моделирование в специализированной САПР.

На рис. 1 показан вид модели 3D П-образных индуктивностей с различным коэффициентом t . Из рисунка наглядно виден общий принцип построения топологии отдельных слоев, а также изменение конструкции в целом при варьировании коэффициента t . Для представленных конструкций согласно выбранным параметрам были сформированы модели.

Соответствующие графики зависимостей значений индуктивности и добротности от частоты для некоторых номиналов показаны на рис. 2–4. Номиналы конструкций, для которых приведены графики, выбраны таким образом, чтобы охватить весь исследуемый диапазон значений индуктивностей.

Для удобства восприятия информации параметры всех исследуемых конструкций сведены в табл. 1, в которой указаны индуктивность L , коэффициент t , максимальная частота диапазона рабочих частот F_{MAX} , максимальная добротность

в этом диапазоне Q_{MAX} , а также для частоты F_{MAX} — добротность Q_{LIM} . В качестве диапазона рабочих частот условно был принят диапазон, на котором значение индуктивности отклоняется от номинального не более чем на 10 %, как максимальная степень отклонения для выпускаемых керамических чип-индуктивностей.

Из рисунков и таблицы видно, что диапазоны рабочих частот для рассматриваемых конструкций практически совпадают. При этом наибольшей частотой F_{MAX} для всех номиналов обладают конструкции, соответствующие коэффициенту $t=100$ %. Если проанализировать значения добротностей, то можно сделать вывод о том, что они также очень близки.

Таким образом, изменение коэффициента t для обозначенных индуктивностей не приводит к ощутимому изменению электрических параметров. Однако при этом имеет место изменение количества слоев реализации. Так, например, индуктивность 100 нГн при коэффициенте $t=0$ % содержит 16 слоев, а при $t=100$ % — 11 слоев, что в 1,5 раза меньше. Стоит отметить, что уменьшение количества слоев интегральной структуры способствуют снижению ее стоимости за счет упрощения технологического процесса, а также снижению объема проводимых вычислений и, как следствие, сокращению времени проектирования.

На рис. 5 показаны диапазоны рабочих частот индуктивностей с коэффициентом $t=100$ % для оценки использования представленного типа конструкции с различными номиналами в СВЧ-

Параметры 3D П-образных индуктивностей

L, нГн	t, %	F _{MAX} , МГц	Q _{MAX}	Q _{ЛИМ}
5	0	1360	51	49
	50	1400	55	52
	100	1440	56	54
10	0	540	45	45
	50	550	48	48
	100	560	50	50
25	0	250	43	43
	50	260	45	45
	100	260	45	45
50	0	140	40	40
	50	150	43	43
	100	160	42	42
100	0	65	30	30
	50	90	38	38
	100	90	34	34
200	0	48	26	26
	50	52	28	28
	100	52	24	24

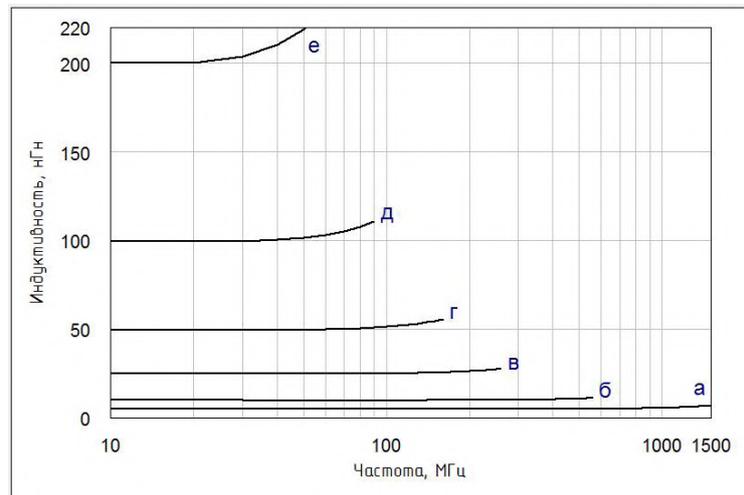


Рис. 5. Диапазон рабочих частот для 3D П-образной индуктивности с коэффициентом перекрытия витков 100 %:
 а — 5 нГн, б — 10 нГн, в — 25 нГн, г — 50 нГн,
 д — 100 нГн, е — 200 нГн

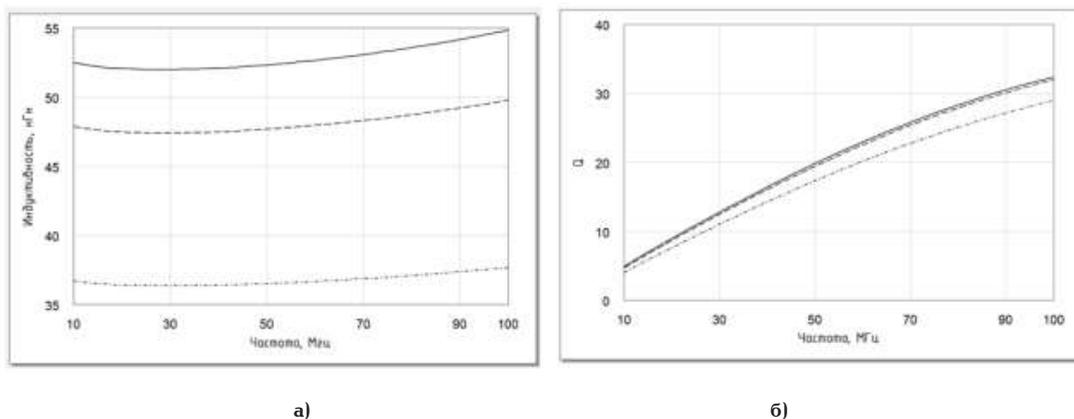


Рис. 6. График зависимости индуктивности а) и добротности б) от частоты для 3D П-образной индуктивности с пятью слоями реализации и с коэффициентом перекрытия витков:

..... 0 %, - - - - - 50 %, ————— 100 %

диапазоне. Из рисунка можно получить сведения о применимости индуктивности того или иного номинала на конкретной частоте.

На рис. 6 представлены графики 3D П-образных индуктивностей с заданной площадью большего витка спирали, реализованных в пяти слоях. Как видно из рисунка, использование конструкции с коэффициентом $t=100\%$ позволяет получить в 1,5 раза большую индуктивность по сравнению с аналогичной конструкцией с коэффициентом $t=0\%$. Это показывает, что коэффициенту $t=100\%$ соответствует большая степень интеграции.

Принимая во внимание все вышесказанное, можно сделать вывод о том, что конструкция 3D П-образной индуктивности с полным перекрытием витков обладает лучшим сочетанием электрических характеристик и конструктивных параметров, так как ей соответствует наименьшее количество слоев реализации при прочих равных конструктивных и электрических характеристиках.

Также можно отметить, что данная конструкция подходит для реализации широкого диапазона номиналов индуктивности (от 5 до 200 нГн), необходимых при создании многослойных интегральных устройств, на значительном частотном диапазоне (от 10 до 1500 МГц). Это позволяет избежать этапа выбора конструктивного исполнения интегральных индуктивностей, тем самым упрощая процесс проектирования.

Применение многослойной индуктивности в виде 3D П-образной спирали с полным перекрытием витков дает широкие возможности для разработки интегральных устройств. Этим обусловлена

необходимость дальнейшего исследования зависимостей ее электрических характеристик от геометрических параметров для достижения максимально возможной степени интеграции проектируемых конструкций.

Библиографический список

1. Милованов, О. С. Техника сверхвысоких частот : учеб. пособие для вузов / О. С. Милованов, Н. П. Собенин. — М. : Атомиздат. — 1980. — 464 с.
2. Вендик, И. Б. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига / И. Б. Вендик, Д. В. Холодняк, А. В. Симин // Компоненты и технологии. — 2005. — Вып. 5. — С. 190–196.
3. Bahl, Inder. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits / Inder Bahl. — Norwood, MA : Artech House, 2003. — 488 p.
4. Хроленко, Т. С. Интегральные LC-фильтры ВЧ и СВЧ диапазонов на основе современных материалов : дис. ... канд. техн. наук / Т. С. Хроленко. — Омск : ОмГТУ, 2013. — 173 с.
5. Борейко, Д. А. Исследование параметров катушек индуктивности, выполненных по LTCC технологии / Д. А. Борейко, Т. С. Дьяченко, А. И. Тюменцев // Техника радиосвязи. — 2012. — Вып. 17. — С. 73–83.

БОРЕЙКО Денис Александрович, аспирант кафедры «Системы безопасности и средства связи». Адрес для переписки: denbor1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2014 г.

© Д. А. Борейко

03.УДК 621.372.543.2

И. В. ВЕРЕМЕЕВ

Омский государственный
технический университет

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР НА ПАВ-РЕЗОНАТОРАХ С ПОДСТРОЙКОЙ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ

В статье рассматривается возможность применения во входных каскадах систем связи наборов переключаемых ПАВ-фильтров и перестраиваемых фильтров на ПАВ-резонаторах. Предлагается новый подход к созданию многоканальных перестраиваемых ПАВ-фильтров на основе лестничных фильтров, комбинирующий преимущества наборов переключаемых ПАВ-фильтров и плавно перестраиваемых варикапами фильтров на ПАВ-резонаторах. Предложенная конструкция многоканального фильтра обладает возможностью перестройки полосы пропускания в широком диапазоне, изменения ширины полосы пропускания каналов и коррекции центральной частоты канала.

Ключевые слова: перестраиваемый фильтр, многоканальный, ПАВ-резонатор.

Необходимыми требованиями современных систем связи являются поддержка нескольких стандартов связи и работа в широком частотном диапазоне, достигаемые за счет реализации перестраиваемых входных каскадов. Для создания таких каскадов необходима разработка высокочастотных

(ВЧ) перестраиваемых фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ), способных изменять ширину полосы пропускания и/или центральную частоту в широком диапазоне частот, обладая высокой избирательностью и малыми вносимыми потерями.

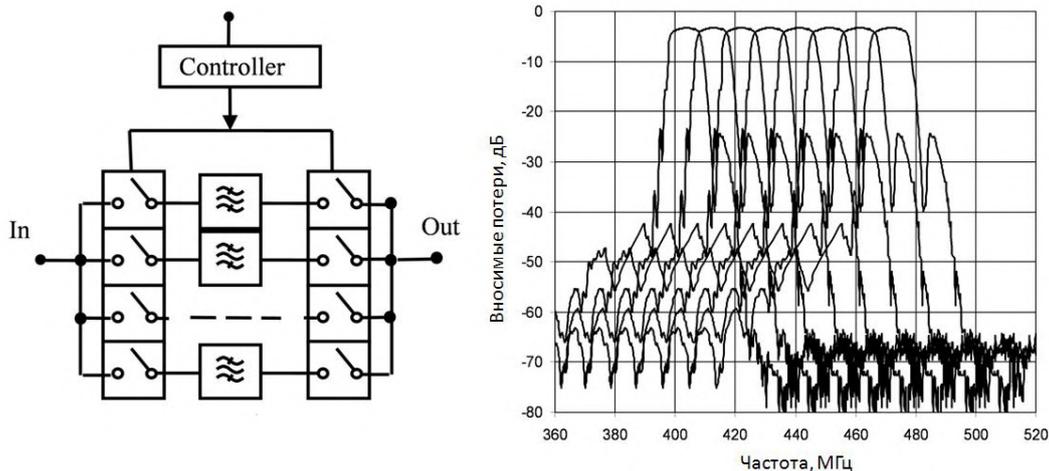


Рис. 1. Переключаемый многоканальный набор ПАВ-фильтров

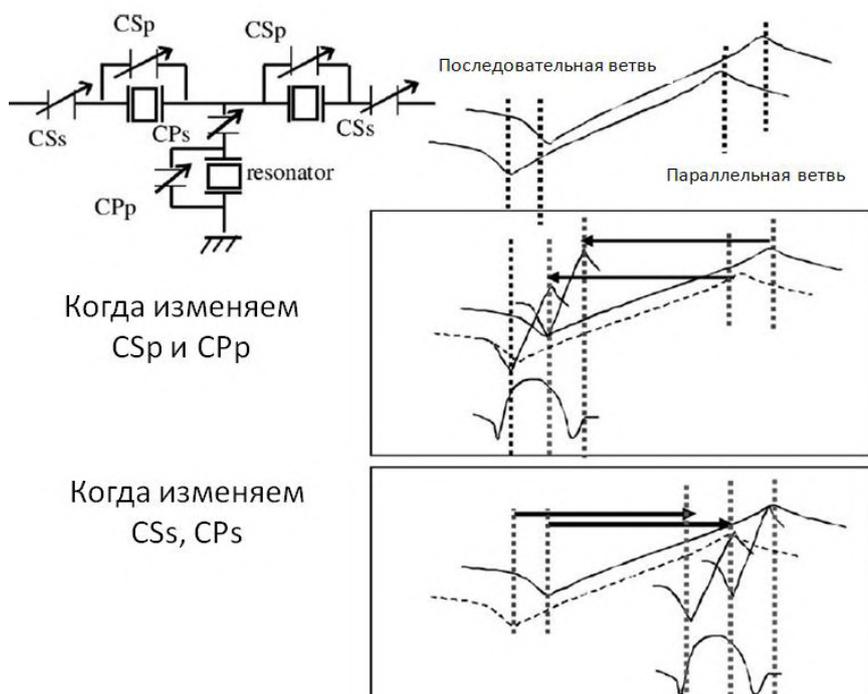


Рис. 2. Структура перестраиваемого варикапами фильтра на ПАВ-резонаторах

В настоящее время во входных каскадах используются наборы переключаемых ПАВ-фильтров [1]. Такой набор фильтров (рис. 1) способен переключать полосы пропускания (каналы) в широком частотном диапазоне (100 % и более), но он слишком большой и дорогой для использования, например, в компактных носимых системах связи. Решением этой проблемы может стать создание миниатюрных перестраиваемых ПАВ-фильтров.

Среди известных подходов к разработке перестраиваемых ПАВ-фильтров [2, 3] наибольший интерес вызывает разработка ВЧ фильтров на широкополосных ПАВ-резонаторах с перестройкой частоты, достигаемой за счет изменения дополнительных емкостей [4].

Основная структура перестраиваемого фильтра точно такая же, как и у обычного фильтра лестничного типа (рис. 2). Варикапы подключаются к ПАВ-резонаторам в последовательных и параллель-

ных ветвях фильтра. Варикапы, подключенные параллельно с ПАВ-резонаторами, смещают их антирезонансные частоты, в то время как варикапы, подключенные последовательно, смещают их резонансные частоты. Таким образом, независимо корректируется положение верхней и нижней границы полосы пропускания фильтра. Для достижения большого диапазона перестройки в данном типе фильтра необходимо создание широкополосного ПАВ-резонатора.

На рис. 3 представлены измеренные характеристики широкополосного ПАВ-резонатора, изготовленного на 36°YX срезе LiTaO_3 на частоту 200 МГц. Для расчета параметров эквивалентной схемы резонатора использовался метод эквивалентных схем для однопортовых ПАВ-резонаторов [5].

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f_{3dB}}, R_1 = \frac{1}{G_m}, L_1 = \frac{Q \cdot R_1}{\omega_0}, C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_1},$$

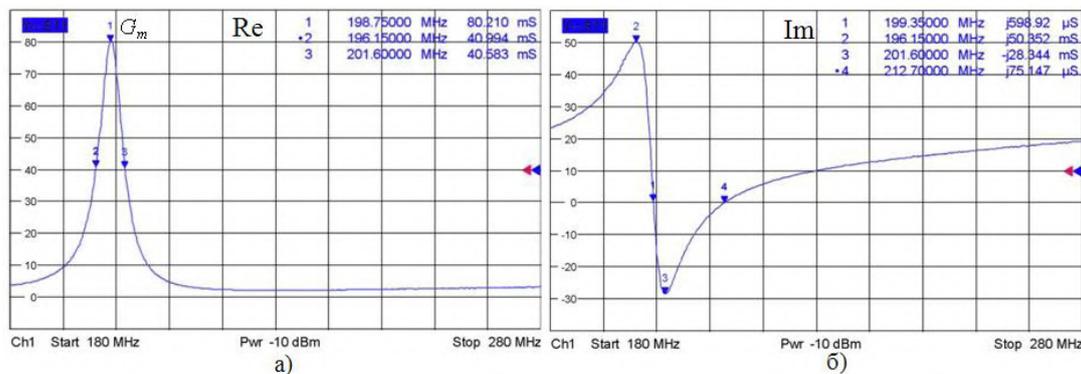


Рис. 3. Измеренная реальная (а) и мнимая часть (б) проводимости ПАВ-резонатора на 36°УХ срезе LiTaO₃ на частоту 200 МГц

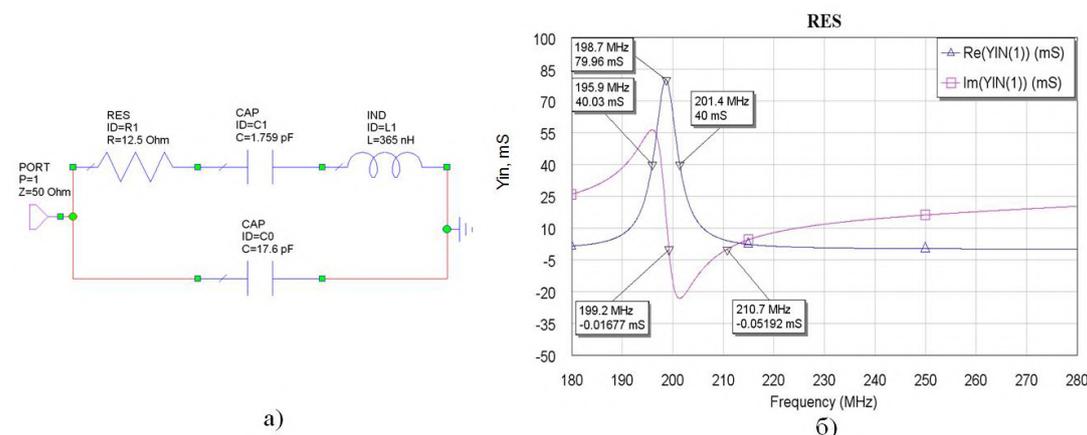


Рис. 4. Эквивалентная схема (а) и расчетные характеристики проводимости (б) 200 МГц ПАВ-резонатора на 36°УХ срезе LiTaO₃

где G_m — максимальное значение реальной части проводимости, Δf_{3db} — полоса пропускания по уровню $G_m/2$.

На рис. 4 показана эквивалентная схема ПАВ-резонатора и расчетные характеристики, полученные с помощью компьютерного моделирования. Расчетные и измеренные характеристики резонатора показывают хорошее совпадение, что подтверждает правильность расчета эквивалентной схемы.

На рис. 5 представлены результаты моделирования перестраиваемого фильтра на широкополосных ПАВ-резонаторах с перестройкой частоты, достигаемой за счет изменения дополнительных емкостей в параллельных и последовательных ветвях фильтра. Варикапы, подключенные параллельно резонаторам, изменялись в диапазоне 0–14 пФ, а варикапы, подключенные последовательно резонаторам, изменялись в диапазоне 7–45 пФ. Диапазон перестройки фильтра составил 14 МГц. К достоинствам данного метода относится простая и плавная перестройка фильтра и возможность изменять ширину полосы пропускания фильтра, однако частотный диапазон перестройки таких фильтров (<5%) не достаточен для использования в широкополосных многоканальных системах связи.

В статье предлагается новый подход к созданию многоканальных перестраиваемых ПАВ-фильтров на основе лестничных фильтров, комбинирующий преимущества наборов переключаемых ПАВ-фильтров и плавно перестраиваемых варикапами фильтров на ПАВ-резонаторах. В предложенной конструкции многоканального фильтра на ПАВ-резонаторах (рис. 6) полоса пропускания изменяется

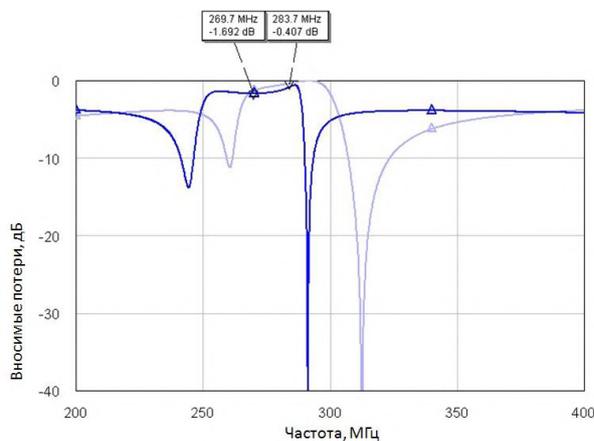


Рис. 5. АЧХ перестраиваемого варикапами фильтра на ПАВ-резонаторах

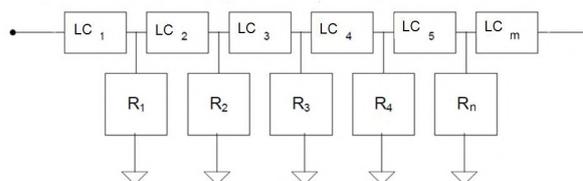


Рис. 6. Схема многоканального фильтра на ПАВ-резонаторах с перестраиваемым LC-резонатором в последовательной ветви

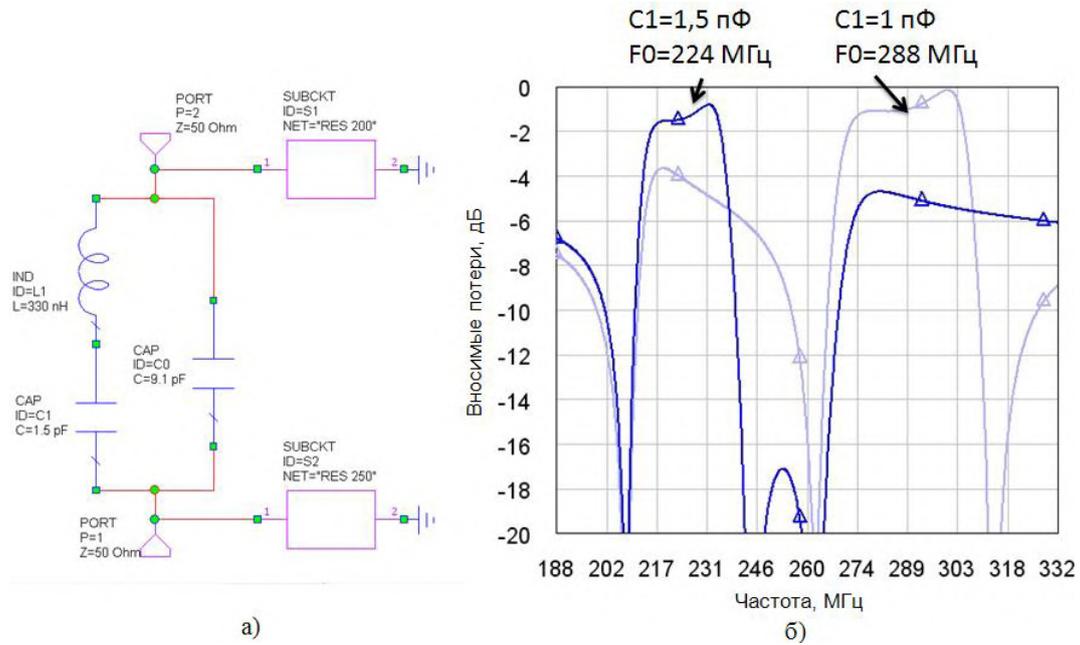


Рис. 7. Схема (а) и расчетные АЧХ (б) 2-канального фильтра на ПАВ-резонаторах с перестраиваемым LC-резонатором в последовательной ветви

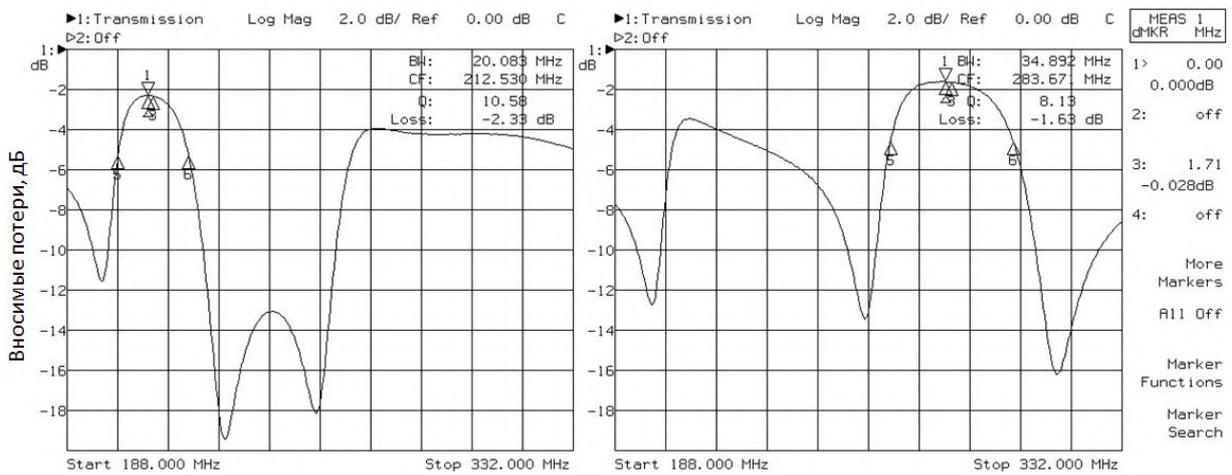


Рис. 8. Измеренные АЧХ 2-канального фильтра на ПАВ-резонаторах с перестраиваемым LC-резонатором в последовательной ветви

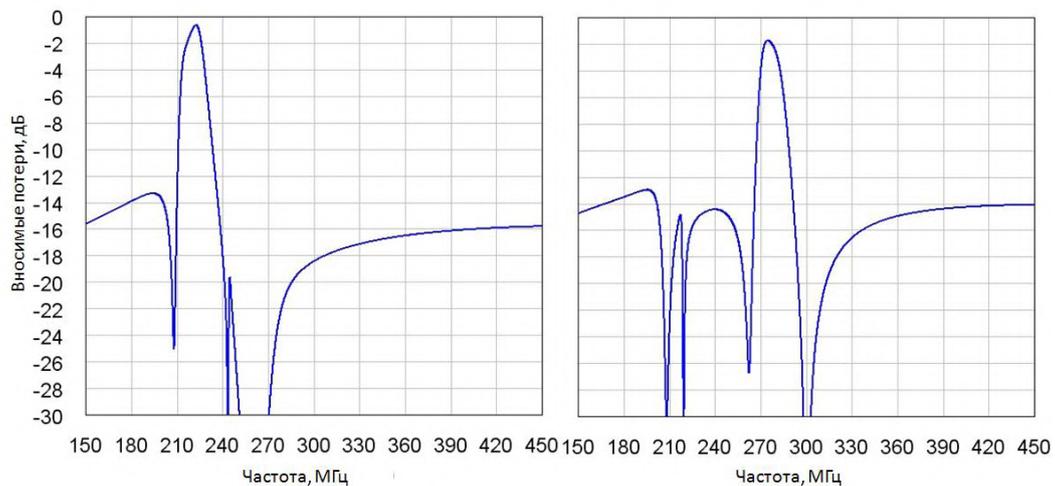


Рис. 9. Расчетные АЧХ 2-канального 5–6 % фильтра на ПАВ-резонаторах с двумя перестраиваемыми LC-резонаторами в последовательной ветви

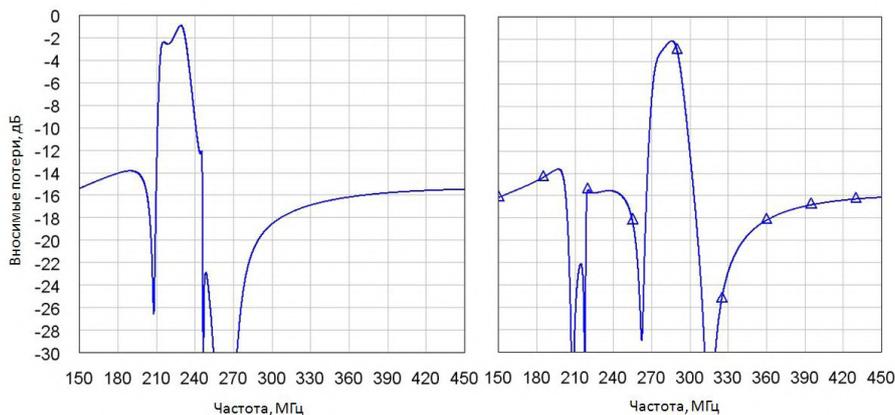


Рис. 10. Расчетные АЧХ 2-канального 7,5–10 % фильтра на ПАВ-резонаторах с двумя перестраиваемыми LC-резонаторами в последовательной ветви

подстройкой нерезонансных элементов (индуктивностей и емкостей) в последовательных ветвях фильтра, а ПАВ-резонаторы в параллельных ветвях остаются фиксированными.

На рис. 7 представлены результаты моделирования 2-канального фильтра с перестраиваемым LC-резонатором в последовательной ветви и двумя канальными ПАВ-резонаторами в параллельных ветвях фильтра. Изменением емкости варикапа С1 в последовательной ветви фильтра в диапазоне 1–1,5 пФ достигнута перестройка центральной частоты фильтра с 224 МГц до 288 МГц. На рис. 8 показаны измеренные характеристики 2-канального фильтра. Расчетные и измеренные характеристики показывают хорошее совпадение.

Для увеличения избирательности фильтра добавлена вторая последовательная ветвь с перестраиваемым LC-резонатором и оптимизированы параметры варикапов. На рис. 9 показаны расчетные характеристики оптимизированного 2-канального фильтра на ПАВ-резонаторах на центральные частоты 220,7 МГц и 276,5 МГц. Фильтр показал диапазон перестройки 55,8 МГц (22,5 %), вносимые потери менее 1,7 дБ, полосу пропускания 13,8 МГц (5–6 %) по уровню -3дБ, подавление соседнего канала 15 дБ. Дальнейшее увеличение избирательности фильтра может быть достигнуто за счет каскадирования.

Для данной конструкции перестраиваемого фильтра особо следует отметить возможность коррекции центральной частоты канала и/или ширины полосы пропускания перестраиваемого фильтра, что невозможно при использовании наборов переключаемых фильтров. Это позволяет, например, компенсировать температурный уход частоты ПАВ-фильтров, обеспечивая стабильную работу в широком диапазоне температур от -60 до $+60$ °С и дает возможность создавать системы связи для экстремальных условий эксплуатации. На рис. 10 показаны расчетные характеристики оптимизированного 2-канального фильтра на ПАВ-резонаторах резонаторах на центральные частоты 224 МГц и 285 МГц. Фильтр выполнен по той же схеме, что и показанный на рис. 9, но за счет подстройки варикапов ширина полосы пропускания фильтра увеличилась до 21,8 МГц (7,5–10 %), а центральные частоты каналов были скорректированы.

Предложенная конструкция многоканального фильтра с подстройкой полосы пропускания обладает следующими преимуществами:

- возможность создавать фильтр с любым числом каналов (диапазоном перестройки);

- возможность корректировать центральную частоту и/или ширину полосы пропускания каналов фильтра;

- малые вносимые потери;

- менее строгие требования к качеству ПАВ-резонаторов, чем при других подходах;

- себестоимость перестраиваемого фильтра меньше, чем у набора переключаемых фильтров.

Разрабатываемые по предложенному методу перестраиваемые устройства на ПАВ могут успешно использоваться в качестве преселектора УКВ связного радиоприемного устройства, широкодиапазонного сканирующего приемника, многоканального приемника в системах радиомониторинга в диапазоне частот до 2,5 ГГц. Данный тип фильтров может в будущем применяться в системах связи, например, в местах разведки, добычи и распределения углеводородов, так как диапазон рабочих температур эксплуатации этих устройств позволяет работать в жестких условиях Крайнего Севера и зонах северных широт.

Библиографический список

1. Doberstein, S. Switchable Low-Loss SAW Filter Banks with MEMS Switches / S. Doberstein // Proceeding IEEE Ultrasonics Symposium, October 11–14. – San Diego, CA, USA, 2010. – P. 1294–1297.
2. Веремеев, И. В. Основные подходы к разработке современных перестраиваемых и переключаемых высокочастотных ПАВ-фильтров / И. В. Веремеев, В. А. Аржанов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – Омск, 2014. – № 1 (127). – С. 205–211.
3. Hashimoto, K. Tunable RF SAW/BAW Filters: Dream or Reality? / K. Hashimoto, S. Tanaka, M. Esashi // Proceeding IEEE IFCS-EFTF, October 18–21. – Orlando, Florida, USA, 2011. – P. 965–972.
4. Fenzi, N. Multimode bandpass SAW filter using Reconfigurable Resonance Technology / N. Fenzi [et al.] // Proceeding IEEE Ultrasonics Symposium, October 11–14. – San Diego, CA, USA, 2010. – P. 864–867.
5. Soluch, W. Scattering Matrix Approach to One Port SAW Resonators / W. Soluch // Proceeding IEEE IFCS-EFTF, April 13–16. – Besancon, France, 1999. – P. 859–862.

ВЕРЕМЕЕВ Иван Васильевич, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», младший научный сотрудник ОАО «ОНИИП». Адрес для переписки: titanqwe@ya.ru

Статья поступила в редакцию 07.11.14 г.

© И. В. Веремеев

ИМИТАЦИОННАЯ ЭКСПЕРТИЗА ПРОЕКТОВ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОБЛЕМ

Рассматриваются задачи и средства выполнения имитационной экспертизы проектов, предлагаемых для решения транспортных проблем мегаполисов. Приводятся примеры имитационной экспресс-экспертизы решений, принятых для улучшения дорожной ситуации в городе Омске.

Ключевые слова: имитационное моделирование, улично-дорожная сеть, автоматизированная система управления дорожным движением.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-07-00149-а.

Введение. Проблема совершенствования транспортной инфраструктуры больших городов является одной из наиболее острых проблем повышения уровня жизни людей, и в обозримом будущем ее острота будет возрастать, поскольку темпы развития улично-дорожных сетей (УДС) городов значительно отстают от темпов автомобилизации населения и темпов строительства. При постоянном росте числа автомобилей построить адекватную транспортную сеть становится невозможно даже в условиях отсутствия финансовых ограничений из-за дефицита свободных площадей и экологических последствий [1].

В городе Омске также имеется множество транспортных проблем, в числе которых перегруженный общественный транспорт, недостаточное количество парковочных мест, недостаточно эффективное управление дорожным движением, систематические транспортные заторы и т.д. Для решения этих проблем приходится регулярно принимать и осуществлять решения, направленные на устранение «узких мест» УДС и оптимизацию управления дорожным движением. Обоснование принимаемых решений посредством расчета усредненных характеристик транспортных потоков (ТП), расчета пропускных способностей дорог и перекрестков, циклов и фаз светосигнальных установок (ССУ) и т.д. не вполне корректно, поскольку не позволяет адекватно учитывать стохастические составляющие дорожного движения. Тем более что особенно значимыми эти стохастические составляющие становятся в условиях высокой транспортной нагрузки и в часы пик.

Одним из наиболее адекватных современных инструментов, используемых для выработки и экспертизы решений в области совершенствования транспортной инфраструктуры, является имитационное моделирование (ИМ).

Существуют три основных подхода к ИМ: макро моделирование, микро моделирование и мезомоделирование.

Макромоделирование описывает движение автомобилей в усредненных терминах, таких как

средняя плотность, средняя скорость, усредненный поток и т.д. При таком подходе транспортный поток уподобляется движению сжимаемой мотивированной жидкости, поэтому этот подход называют также гидродинамическим.

Микро моделирование описывает каждый автомобиль индивидуально, и потому в явном виде моделируется движение каждого автомобиля.

Мезомоделирование — это промежуточное звено между двумя предыдущими типами моделей. Моделирование основано на кинетических уравнениях. Поток в таких моделях описывается плотностью распределения автомобилей в фазовом пространстве, т.е. пространстве координат и скоростей автомобилей.

Модели для проведения имитационной экспертизы разрабатываются на уровне микро моделирования.

Одной из наиболее популярных концепций в микро моделировании является концепция следования за лидером с безопасной дистанцией. Модели следования за лидером позволяют составить общую картину поведения транспортных потоков, учитывая индивидуальное поведение транспортных средств и его вероятностный характер. Самой распространенной моделью следования за лидером в настоящее время считается психофизиологическая модель восприятия Видемана [2].

1. Психофизиологическая модель Видемана.

Основная идея модели Видемана состоит в том, что водитель транспортного средства (ТС) ориентируется на впереди движущийся автомобиль [2]. Модель была представлена Видеманом в 1974 году, с тех пор она постоянно совершенствуется.

Модель Видемана использует случайные числа для создания разнородного потока ТС. Модель индивидуальных ТС основывается на реагировании водителей в контексте режимов пространственного взаимодействия ТС. Эти режимы в модели Видемана определяются через разделяющие их границы — пороги. Пороги же, в свою очередь, зависят от скоростей ТС и расстояний между следующими друг за другом ТС. Модель Видемана содержит

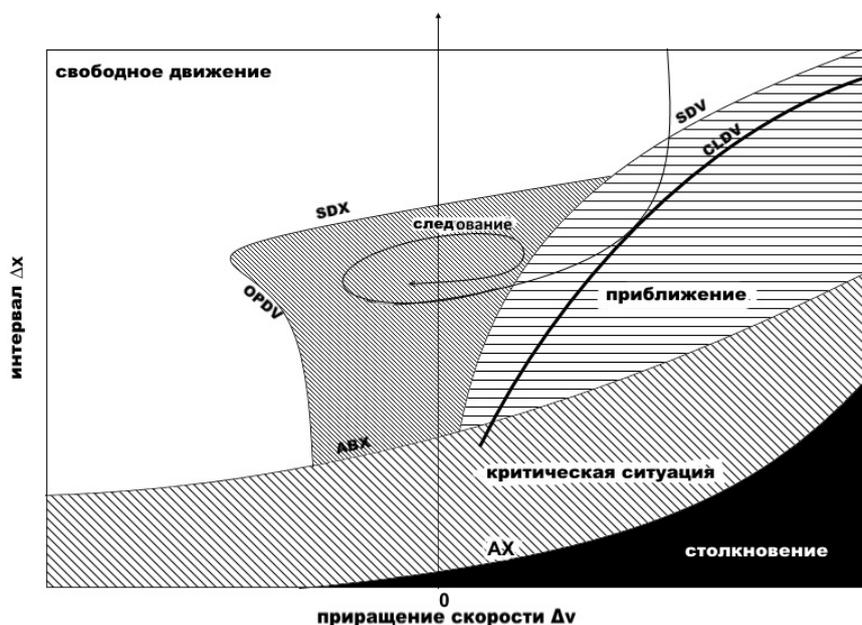


Рис. 1. Схематичное представление режимов модели Видемана [2]

режимы: свободное движение, приближение, критическая ситуация, следование [3]. Каждый из четырех режимов использует разные правила определения ускорения. Когда изменяются режимы модели, изменяются и правила ускорения. На рис. 1 показаны режимы в модели Видемана и пороги между ними.

Опишем пороги, которые используются в модели.

Пороги Δx , ABX , SDX указывает минимально допустимую дистанцию между автомобилями в зависимости от их скоростей и расстояния между ними.

Порог восприятия SDV описывает момент, когда водитель замечает, что он приближается к более медленному ТС.

Порог восприятия $CLDV$ проявляется на малых расстояниях между ТС, когда требуется начинать снижение скорости (в PTV VISSIM принято, что этот порог SDV и порог $CLDV$ равны).

Порог восприятия $OPDV$ обозначает момент, когда водитель осознает, что он едет слишком медленно и можно ускориться.

На рис. 1 также показано, как функционируют следующие режимы:

Свободное движение. Этот режим наступает, когда ТС находится выше всех порогов, то есть движется свободно. ТС использует максимальное ускорение, пока не достигнет предпочитаемой скорости.

Следование. Пороги SDV , SDX , $OPDV$ и ABX образуют режим следования, когда ТС движутся друг за другом с практически неизменными интервалами.

Приближение. Когда ТС проходит порог SDV и $CLDV$, водитель замечает, что он приближается к более медленному ТС и, соответственно, тормозит, чтобы избежать столкновения.

Критическая ситуация. Модель переходит в этот режим, когда расстояние до ближайшего впереди идущего ТС меньше, чем ABX . Водитель начинает тормозить, чтобы избежать столкновения.

Столкновение. Ситуация, когда ТС сталкиваются, происходит авария и движение далее не происходит, не рассматривается в модели Видемана.

Эта модель стала эталонной. Одним из ее плюсов является то, что изменение с течением лет манеры

езды и модернизация ТС корректно отображаются в данной модели. Психофизиологическая модель Видемана используется в среде PTV VISSIM [3].

В студенческой научно-исследовательской лаборатории «Информационные технологии и автоматизация управления» при кафедре АСОИУ ОмГТУ для изучения проблем, связанных с имитационным моделированием транспортных потоков и сетей, используется пакет программ PTV VISION [4], в состав которого входит программа PTV VISSIM для микромоделирования транспортных потоков. С использованием этого пакета проводится экспертиза проектов решений, принимаемых для улучшения организации дорожного движения. В качестве примеров такой экспертизы ниже приводится экспертиза решения о запрете левого поворота с улицы 70 лет Октября на улицу Конева и о ликвидации нерегулируемого пешеходного перехода у остановки «Консум-центр».

2. Моделирование перекрестка «улица 70 лет Октября — улица Конева». Рассмотрим пример экспертизы на реальном участке УДС город Омска. Одним из проблемных мест улично-дорожной системы город Омска является перекресток «улица 70 лет Октября — улица Конева». Высокая нагрузка на него обусловлена находящимися вблизи мостом, крупными торговыми центрами и плотной жилой застройкой.

Данные для построения модели были получены следующим образом.

Все размеры, направления, расположение объектов (остановки, пешеходные переходы, светофоры и т.д.) получены по картам Google и Яндекс.

Параметры режимов работы светосигнальных установок (ССУ) были измерены на месте вручную.

Интенсивность транспортного потока была установлена экспериментально в час пик.

Количество общественного транспорта и его маршруты были получены из справочника 2Гис. На моделируемом участке 6 остановок общественного транспорта, через которые проходит 116 маршрутов.

Расписание общественного транспорта получено из интернет-ресурсов.

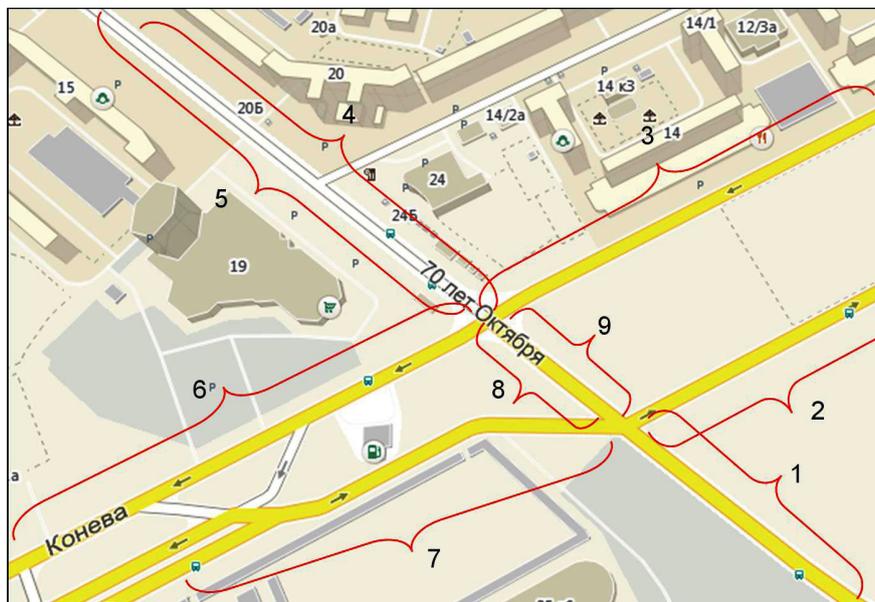


Рис. 2. Контрольные участки

Таблица 1

Сравнение оценок средних скоростей

Номер участка	Длина, м	Среднее время, с	Средняя скорость, км/ч	Средняя скорость по «Яндекс.пробки», км/ч	Разница средних скоростей, км/ч
1	150	284	1,8	5	3,2
2	420	31	48,6	50	1,4
3	450	1495	1,8	5	3,2
4	230	16	52,2	50	2,2
5	100	166	1,8	5	3,2
6	120	10	43,2	44	0,8
7	370	70,85	18	21	3
8	170	12,14	50,4	50	0,4
9	110	153	1,8	5	3,2
10	100	179	1,8	5	3,2

По этим данным была построена модель в PTV VISSIM.

Приближенно о достоверности построенной математической модели в пакете VISSIM можно судить, сравнивая визуализацию модели с реальной ситуацией на перекрестке.

Для более точной оценки достоверности проводилось сравнение выходных данных модели и данных, полученных из сервиса «Яндекс.пробки». Модель была разбита на контрольные участки, как показано на рис. 2, и на них замерялись средние скорости проезда. Перекресток был разбит на 10 участков. В модели на этих участках устанавливались «датчики», которые замеряли среднее время проезда через участок за все время моделирования (1000 минут). Так как длины участков известны, средние скорости проезда через каждый участок определялись расчетным путем.

Из сервиса «Яндекс.пробки» были получены средние скорости ТС на этих участках, которые вместе с другими данными приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что средние скорости на участках, полученные путем моделирования, совпадают с полученными из сервиса «Яндекс.пробки» (раз-

личия не превышают 3,2 км/ч), что свидетельствует об адекватности построенной модели.

В начале 2014 года правила проезда перекрестка были изменены городской администрацией. Был запрещен поворот налево с ул. 70 лет Октября на ул. Конева. Эти изменения были внесены в модель, затем проведено сравнение на одинаковых потоках. Запрет левого поворота улучшил ситуацию на перекрестке, и в модели это наглядно подтверждено. Время проезда участка изменилось с 71,27 с до 32,59 с, т. е. уменьшилось более чем вдвое.

3. Экспертиза решения о ликвидации нерегулируемого пешеходного перехода и остановки общественного транспорта. Аналогично проведена проектная экспертиза участка от пешеходного перехода на остановке «Технический университет» до пешеходного перехода на остановке «Медицинская академия». Пример визуализации математической модели данного участка с помощью PTV VISSIM представлен на рис. 3.

Для проектной экспертизы было выбрано решение о ликвидации нерегулируемого пешеходного перехода и остановки «Консум-центр».



Рис. 3. Пример визуализации участка

Промоделировано две ситуации: первая — с пешеходным переходом и остановкой, вторая — без них. В обоих случаях в системе проходил один и тот же случайный поток машин. В случае с переходом и остановкой в этом месте происходит затор, что увеличивает время простоя. Среднее время прохождения участка при наличии перехода и остановки составило 74,02 с, а без перехода и остановки — 35,88 с. Таким образом, в результате ликвидации перехода и остановки среднее время прохождения участка уменьшилось более чем в 2 раза.

Выводы. С помощью имитационного моделирования [5] можно оперативно производить экспертизу различных проектных решений в транспортных системах. Использование такого подхода позволяет быстро оценивать проектные решения, делать выводы об их качестве.

В ряде европейских стран регулярно выполняются транспортные проекты с помощью имитационного моделирования [6]. В Германии пакет моделирования PTV VISION одобрен и используется министерством транспорта ФРГ [7]. В последние годы PTV VISION начинает приобретать популярность и в России.

Транспортная система города Омска требует серьезных изменений, об этом свидетельствуют заторы на дорогах, большое количество дорожно-транспортных происшествий, проблемы парковки и т.д. Если применять имитационную экспертизу проектных решений, можно отклонять неудачные проекты и тем самым предупреждать большое количество проблем, которые могли бы возникнуть после их реализации, и оптимизировать те решения, реализация которых целесообразна.

Экономическая и социальная эффективность некоторых реализованных в городе Омске транспортных решений оценивается неоднозначно. И введение в практику принятия подобных решений обязательного проведения их предварительной имитационной экспертизы, несомненно, принесло бы городу весьма ощутимую пользу.

Библиографический список

1. Горев, А. Э. Основы теории транспортных систем / А. Э. Горев. — СПб. : СПбГАСУ, 2010. — 210 с.
2. Treiber, M. Christian Thiemann Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation / M. Treiber, A. Kesting. — London : Springer, 2012. — С. 221–222.
3. Olstam, J. J. Comparison of Car-following models / J. J. Olstam, A. Tapani // Swedish National Road and Transport Research Institute. — 2004. — 45 с.
4. Задорожный, В. Н. Обзор программ моделирования транспортных потоков / В. Н. Задорожный, Е. Б. Юдин // Динамика систем, механизмов и машин. — Омск : ОмГТУ, 2012. — № 1. — С. 254–257.
5. Задорожный, В. Н. Оптимизация ресурсов транспортной сети города методом направляющих гипербол / В. Н. Задорожный, М. А. Корнач, Е. Б. Юдин // Динамика систем, механизмов и машин. — Омск : ОмГТУ, 2014. — № 3. — С. 169–172.
6. Толуев, Ю. И. Инженерные традиции в имитационном моделировании производственных и логистических систем / Ю. И. Толуев, Д. А. Иванов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2011) : материалы конф. : в 2 т. — СПб., 2011. — Т. 1. — С. 75–82.
7. Бекмагамбетов, М. М. Анализ современных программных средств транспортного моделирования / М. М. Бекмагамбетов, А. В. Кочетков // Журнал автомобильных инженеров. — 2012. — № 6 (77). — С. 25–34.

ЗАДОРОЖНЫЙ Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Адрес для переписки: zwn@yandex.ru

ЗАВАЛЬНЫЙ Александр Сергеевич, магистрант гр. ИВМ-524 факультета информационных технологий и компьютерных систем.

Адрес для переписки: sanchopa@mail.ru

ШИКЛО Ольга Борисовна, магистрант гр. ИВМ-524 факультета информационных технологий и компьютерных систем.

Адрес для переписки: shikloolga@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.12.2014 г.

© В. Н. Задорожный, А. С. Завальный, О. Б. Шикло

ДВУХУРОВНЕВЫЙ МНОГОМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧАМ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА

Предлагается многоуровневый аналитико-имитационный метод для поиска оптимального распределения финансового ресурса, выделенного на повышение качества дорожного покрытия, по участкам (дорогам) транспортной сети.

Ключевые слова: транспортные сети, параметрическая оптимизация, многоуровневое аналитико-имитационное моделирование.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-07-00149-а, РФФИ 14-01-31551 мол_а.

Введение. На данный момент остро стоит проблема низкой пропускной способности улично-дорожной сети (УДС). Одним из способов повышения пропускной способности является улучшение качества покрытия дорог. Увеличение пропускной способности УДС влияет на среднее время проезда через нее. Одним из способов минимизации среднего времени проезда через сеть является улучшение качества покрытия дорог. На практике суммарное количество ресурса, затрачиваемого на УДС, ограничено. Исходя из вышесказанного, можно сформулировать следующую задачу поиска оптимального распределения ресурса.

Задача поиска оптимального распределения ресурса по дорогам сети заключается в минимизации среднего времени E проезда через сеть:

$$E(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i w_i \rightarrow \min_{\vec{r}}, \quad (1)$$

где α_i — среднее число посещений i -го перекрестка транспортным средством (ТС), заходящим в сеть,

w_i — среднее время проезда по i -й дороге, которое рассчитывается путем имитационного моделирования,

n — число дорог сети,

$\vec{r} = (r_1, \dots, r_n)$ — распределение ресурса по дорогам 1, ..., n сети.

Варьируемые параметры r_1, \dots, r_n в задаче (1) — это значения ресурса (денежных средств), выделяемого на улучшение качества покрытия дорог. Ограничением является количество выделенного ресурса M^* :

$$M(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n c_i r_i^{\beta_i} = M^* = \text{const}, \quad (2)$$

где c_i — стоимостные коэффициенты,

β_i — коэффициенты нелинейности, $i = 1, \dots, n$,

$M^* \geq 0$ — количество выделенного ресурса.

Для решения поставленной задачи разработан метод, построенный на основе метода направляющих гипербол [1], предназначенного для оптимизации однородных немарковских сетей массового обслуживания (СеМО).

1. Описание метода. Задача оптимизации распределения ресурсов транспортных СеМО (ТСеМО) имеет существенные отличия от задачи оптимизации обычных СеМО. Основное отличие состоит в том, что время перемещения заявок по дугам, моделирующим дороги, не равно нулю, а определяется длиной дуги и скоростью заявки на этой дуге.

При этом скорости заявок случайны, причем средняя скорость перемещения заявок по дуге зависит от числа заявок на этой дуге и определяется фундаментальной диаграммой (ФД) соответствующей дороги в форме зависимости средней скорости от плотности потока.

Зависимость максимальной скорости v_{max} от плотности k транспортного потока аппроксимируется формулой [2]:

$$v(k) = \frac{v_{max}}{1 + 0,00001 \cdot k^2}. \quad (3)$$

Для упрощения расчетов в сеть вводятся два метаузла: входной и выходной. Выходной метаузел соединяется со всеми выходными узлами сети, входной — с остальными узлами. Интенсивность Q поступления заявок на входной метаузел рассчитывается на формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (4)$$

где Q_i — интенсивность поступления ТС на i -й узел из внешней среды сети.

Переходные вероятности на выходе входного метаузла определяются таким образом, чтобы интенсивность поступления заявок из него в любой узел i ТСеМО была равна Q_i .

Для решения проблемы вычисления градиентов в [1] используется сепарабельная гиперболическая аппроксимация целевой функции:

$$E^{ap}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \alpha_i W_i(r_i), \quad (5)$$

где

$$W_i(r_i) = \begin{cases} \frac{R_i}{r_i - S_i}, & \text{если } \hat{w}_i^k \neq \hat{w}_i^{k-1} \\ \hat{w}_i^k, & \text{если } \hat{w}_i^k = \hat{w}_i^{k-1} \end{cases},$$

R_i, S_i — коэффициенты аппроксимации, подбираемые по результатам имитационного моделирования [1],

$\hat{w}_i^k, \hat{w}_i^{k-1}$ — оценки средних задержек заявок на дугах $i = 1, \dots, n$ в последней k -й точке факторного пространства и в предыдущей $(k-1)$ -й точке.

Влияние ресурса r_i на i -ю дорогу представлено формулой:

$$v(k, r) = \frac{r_i + v_{\max}}{1 + 0,00001 \cdot k^2}. \quad (6)$$

В проверочных экспериментах количество выделенного ресурса в ТСеМО определяется получаемой из (2) при всех $c_i = \beta_i = 1$ формулой:

$$M(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n r_i. \quad (7)$$

Аппроксимация $\nabla E^{ap}(\vec{r})$ градиента $\nabla E(\vec{r})$ в точке \vec{r}^k , полученная дифференцированием выражения (5), имеет вид:

$$\nabla E^{ap}(\vec{r}) = \left(\alpha_1 \frac{\partial W_1}{\partial r_1}, \dots, \alpha_n \frac{\partial W_n}{\partial r_n} \right), \quad (8)$$

где

$$\frac{\partial W_i}{\partial r_i} = \begin{cases} \frac{-R_i}{(r_i - S_i)^2}, & \text{если } \hat{w}_i^k \neq \hat{w}_i^{k-1} \\ 0, & \text{если } \hat{w}_i^k = \hat{w}_i^{k-1} \end{cases}.$$

Коэффициенты R_i и S_i определяются формулами:

$$S_i = \frac{\hat{w}_i^k r_i^k - \hat{w}_i^{k-1} r_i^{k-1}}{\hat{w}_i^k - \hat{w}_i^{k-1}}, \quad (9)$$

$$R_i = \hat{w}_i^{k-1} (r_i^{k-1} - S_i), \quad i = 1, \dots, n.$$

В остальном разработанный метод аналогичен методу «направляющих гипербол» [1].

2. Система аналитико-имитационного моделирования транспортных систем и потоков. Нахождение ряда параметров, необходимых для применения вышеописанного метода, выполняется автоматически системой аналитико-имитационного моделирования транспортных систем и потоков (САИМ ТСП), в которую встроен метод. САИМ ТСП представляет собой двухуровневую систему (рис. 1), совмещающую в себе несколько подходов к моделированию. Основной концепцией двухуровневой структуры САИМ ТСП является вычисление статистических характеристик дорог и транспортных потоков на уровне транспортных клеточных автоматов (ТКА) и их использование в моделях УДС на уровне транспортной сети массового обслуживания (ТСеМО).

Двухуровневое моделирование УДС, в котором используются ТКА и ТСеМО, позволяет продолжать оптимизацию УДС путем возвращения результатов, полученных на уровне ТСеМО, в модель на ТКА, их уточнения и, при необходимости, перехода к новому циклу оптимизации на уровне ТСеМО и уточне-

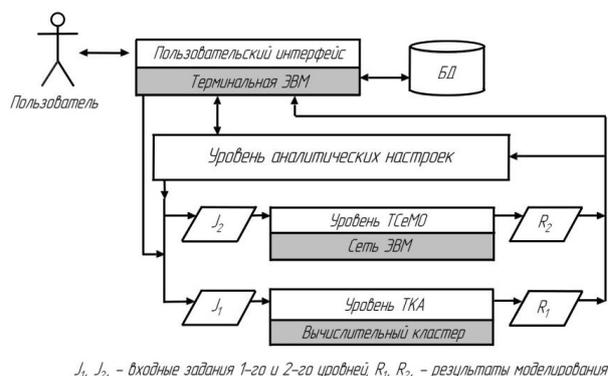


Рис. 1. Архитектура САИМ ТСП

ния на уровне ТКА. Такая система обеспечивает сокращение времени имитационных экспериментов на порядок и более (по сравнению с одноуровневой структурой).

Первый уровень САИМ ТСП использует микро-моделирование на базе транспортных клеточных автоматов, позволяющее учесть логику поведения водителей и правила дорожного движения [3]. Здесь транспортные средства рассматриваются как индивидуальные сущности, обладающие своими характеристиками и поведением, а улично-дорожная сеть представляет собой набор элементов, взаимодействующих между собой. Дорога представляет собой сетку, состоящую из ячеек одинаковой длины. Размер такой сетки на дороге равен $K \cdot N$, где K — количество полос, N — длина дороги. Длина одной ячейки принимается равной средней длине легкового автомобиля. В одной клетке может находиться только один автомобиль. Движение автомобилей моделируется сменой состояний ячеек. Если в ячейке находится автомобиль, то состояние ячейки устанавливается в состояние «занята», в противном случае — «свободна». Переключение состояний ячеек происходит одновременно.

Такой подход позволяет учитывать большое количество факторов, влияющих на движение. Например, тип транспортного средства (легковой/грузовой), стиль вождения водителей (спокойный/агрессивный), маневры на дороге (торможение, разгон, обгон, остановка), ограничения скорости на дороге, качество дорожного полотна, а также случайные факторы (случайные остановки или торможения/превышение скорости). Откалибровав вероятностные параметры случайных факторов, можно значительно улучшить адекватность модели.

Второй уровень САИМ ТСП использует модель, которую нельзя однозначно отнести к мезо- или микро-моделированию. Это связано с тем, что моделирование транспортного потока происходит в виде параллельно функционирующих объектов движения (агентов), что присуще моделям микро-уровня. С другой стороны в разработанной модели не моделируются пространственные взаимодействия между индивидуальными ТС, что характерно для моделей мезоуровня. Пространственные взаимодействия учитываются не путем моделирования, а с помощью соответствующего механизма генерации скорости агентов. Скорость агента, который заходит на дугу, зависит от количества агентов на этой дуге. Процесс моделирования носит событийный характер и управляется с помощью календаря событий.

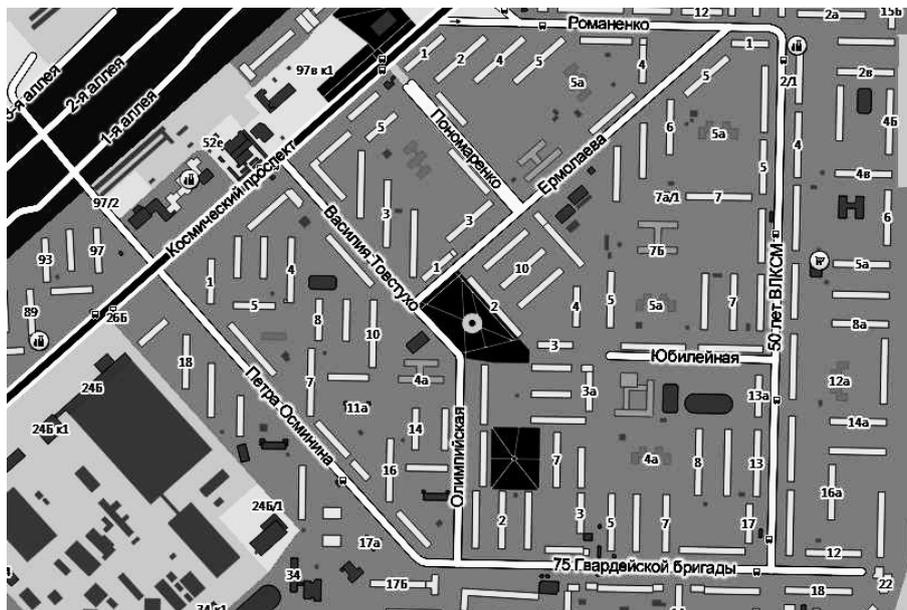


Рис. 2. Участок УДС города Омска

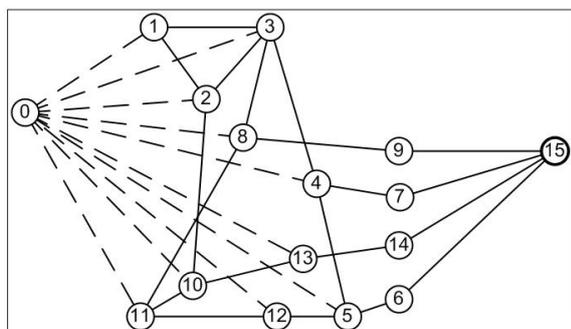


Рис. 3. Пример ТСеМО, построенной по карте участка ТС города

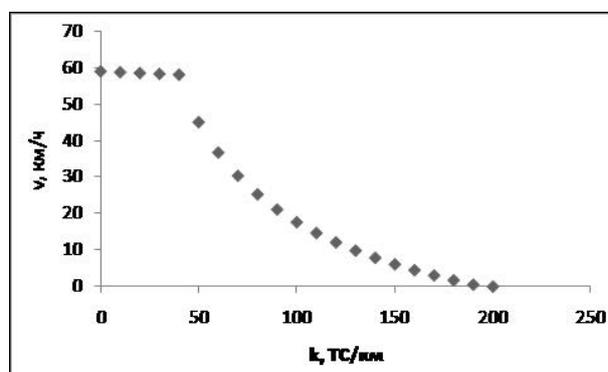


Рис. 4. Пример фундаментальной диаграммы

Уровень ТСеМО предназначен для решения задач оптимизации — поиска распределения ресурса, при котором среднее время проезда через сеть минимально, оптимизация управления светосигнальными установками и т.д.

Входными данными на уровне ТКА являются время моделирования и вероятностные характеристики стиля вождения ТС, транспортная матрица (длина дорог, количество полос, ограничения скорости, данные о взаимном расположении объектов УДС, информация о маршрутах) и данные об интенсивности входного потока.

После того как необходимая информация об исследуемом участке УДС внесена пользователем в программу, запускается процесс моделирования. Результатом работы уровня ТКА является построение фундаментальных диаграмм для каждой дороги, которые отражают зависимость скорости транспортного средства от плотности потока. Полученные фундаментальные диаграммы используются для учета пространственных взаимодействий между ТС в процессе моделирования на уровне ТСеМО. Полученное на уровне ТСеМО приближенно оптимальное распределение ресурса затем снова уточняется на уровне ТКА. Так происходит до тех

пор, пока не будет найдено оптимальное распределение ресурса. Итерации заканчиваются, когда евклидово расстояние между предыдущим и текущим векторами распределения не превышает величины, заданной пользователем.

3. Результаты испытаний САИМ ТСП. Для проверки работоспособности разработанной системы проведен ряд экспериментов с моделью участка УДС г. Омска (рис. 2, 3).

При моделировании на обоих уровнях САИМ ТСП использовались одни и те же входные данные, соответствующие параметрам моделируемой сети. Общее количество распределяемого ресурса M^* принято равным 750 единиц.

По результатам моделирования на уровне ТКА определены ФД (пример ФД приведен на рис. 4), которые далее использовались на уровне ТСеМО. На этом уровне получено оптимальное распределение ресурса по дорогам, показанное на рис. 5 заштрихованной гистограммой. Заметим, что назначение дорогам ресурсов, пропорциональных длинам дорог, в данном случае оказалось близким к оптимальному и уступает ему лишь на 5 % по значению E .

Об адекватности моделей на уровнях ТСеМО и ТКА можно судить по согласованности результатов

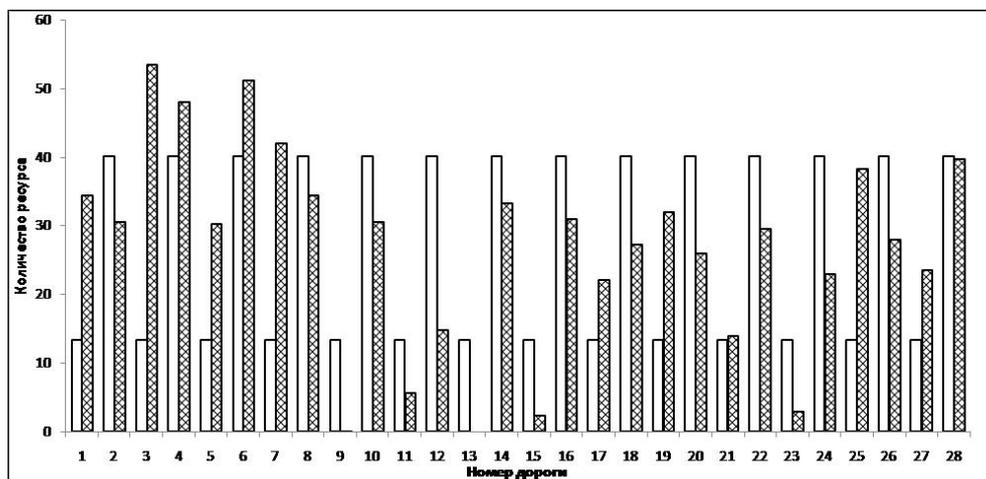


Рис. 5. Распределение ресурса до оптимизации (незаштрихованная гистограмма) и после оптимизации (заштриховано)

Таблица 1

Параметры транспортной сети

Входной и выходной узлы дуги		Вероятность перехода на дугу из входного узла	Длина, км	Интенсивность поступления ТС на дугу из внешней среды сети, ТС/с
1	2	1	0,12	0,07
2	1	0,4	0,12	0,014
2	3	0,3	0,5	0,0105
2	10	0,3	0,36	0,0105
3	1	0,3	0,47	0,007
3	4	0,3	0,68	0,007
3	8	0,4	0,5	0,009333
4	3	0,3	0,68	0,00525
4	5	0,2	0,27	0,0035
4	7	0,5	0,29	0,00875
5	4	0,6	0,27	0,0084
5	6	0,2	0,15	0,0028
5	12	0,2	0,57	0,0028
8	3	0,3	0,5	0,002625
8	9	0,2	0,3	0,00175
8	11	0,5	0,25	0,004375
10	2	0,3	0,36	0,0021
10	11	0,2	0,35	0,0014
10	13	0,5	0,3	0,0035
11	8	0,35	0,25	0,002227
11	10	0,3	0,35	0,001909
11	12	0,35	0,5	0,002227
12	5	0,3	0,57	0,00175
12	11	0,2	0,5	0,001167
12	13	0,5	0,765	0,002917
13	10	0,3	0,3	0,001615
13	12	0,2	0,765	0,001077
13	14	0,5	0,4	0,002692

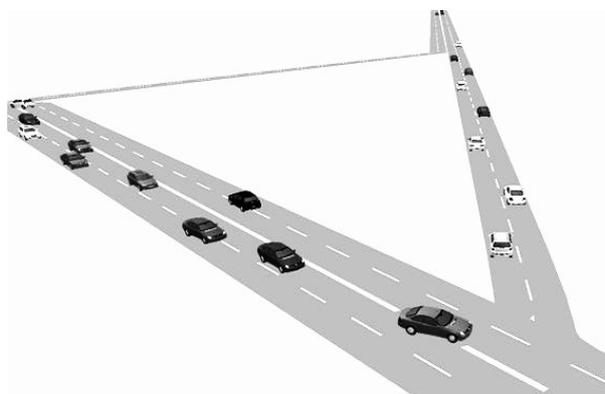


Рис. 6. Фрагмент моделируемой сети в PTV VISSIM

их выполнения при одинаковых исходных данных (табл. 1). В случае существенного расхождения результатов выполнения этих моделей в качестве арбитра использовалась модель, построенная в системе PTV VISSIM (фрагмент анимированного изображения моделируемой сети в PTV VISSIM представлен на рис. 6). Результаты выполнения всех трех моделей сети сопоставлялись при следующих трех вариантах распределения ресурса:

- 1) без использования дополнительного ресурса (табл. 2, колонка 1),
- 2) с использованием базового распределения ресурса (табл. 2, колонка 2),
- 3) с оптимальным распределением ресурса (табл. 2, колонка 3).

Графики изменения средних времен проезда по сети на разных уровнях при вышеуказанных вариантах распределения представлены на рис. 7.

Заключение. Разработанная двухуровневая система аналитико-имитационного моделирования транспортных сетей и потоков позволяет находить оптимальное распределение ресурсов, выделяемых на повышение качества дорог УДС. Актуальность задачи распределения ограниченного ресурса обусловлена целесообразностью достижения при его вложении максимального эффекта. Получаемые с помощью разработанной системы решения позволяют снизить среднее время проезда через сеть на 8–12 %. Применение двухуровневого много-модельного подхода позволяет ускорить решение

Результаты экспериментов

	Без дополнительного ресурса	Распреде- ление (1)	Распреде- ление (2)
ТСеМО	190,04	134,1	122,5
ТКА	173,24	167,7	137,2
VISSIM	213,2	165,3	135,9

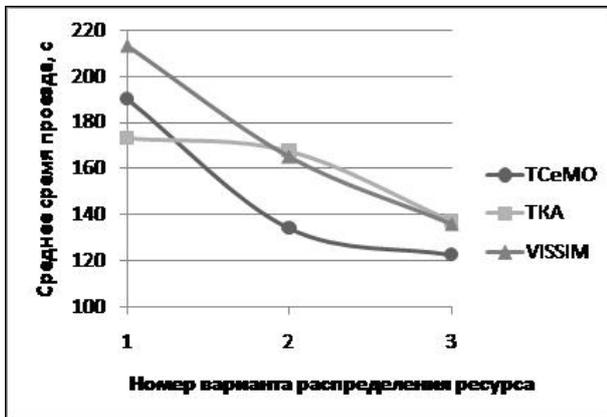


Рис. 7. Графики изменения средних времен проезда на разных уровнях при разных распределениях ресурса

оптимизационных задач при сохранении необходимой точности результатов моделирования. Согласованность результатов, получаемых разными моделями, подтверждает адекватность этих моделей.

Книжная полка

004.4/П82

Проскурин, В. Г. Защита в операционных системах : учеб. пособие для студентов (слушателей) вузов по специальностям 10.05.01 «Компьютерная безопасность», 10.05.03 «Информационная безопасность автоматизированных систем» и 10.05.04 «Информационно-аналитические системы безопасности» по направлению подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность», уровень бакалавр / В. Г. Проскурин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2014. – 192 с. – ISBN 978-5-9912-0379-1.

Подробно рассмотрены основные средства и методы обеспечения информационной безопасности в современных операционных системах: управление доступом, аутентификация, аудит и обнаружение вторжений. Кроме того, отдельно рассматриваются некоторые специфические вопросы, косвенно связанные с обеспечением безопасности операционных систем: централизованное управление политиками безопасности в доменах Windows, особенности обеспечения безопасности операционных систем мобильных устройств, концепция виртуализации операционных систем и ее влияние на информационную безопасность. Изложение теоретического материала иллюстрируется практическими примерами. В конце каждой главы приведен перечень вопросов для самопроверки, в конце пособия — методические рекомендации по его изучению. Для студентов (слушателей) вузов, обучающихся по специальностям 10.05.01 — «Компьютерная безопасность», 10.05.03 — «Информационная безопасность автоматизированных систем» и 10.05.04 — «Информационно-аналитические системы безопасности», по направлению подготовки 10.03.01 — «Информационная безопасность», уровень бакалавр.

1. Задорожный, В. Н. Оптимизация однородных немарковских сетей массового обслуживания / В. Н. Задорожный // Проблемы управления. – 2009. – № 6. – С. 68–75.

2. Задорожный, В. Н. Аналитико-имитационные методы решения актуальных задач системного анализа больших сетей : моногр. / В. Н. Задорожный, Д. Ю. Долгушин, Е. Б. Юдин ; под ред. В. Н. Задорожного. – Омск : ОмГТУ, 2013. – 324 с.

3. Долгушин, Д. Ю. Имитационное моделирование дорожного движения для оценки экологического влияния автотранспорта / Д. Ю. Долгушин, Т. А. Мызникова // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 4.1 (38). – С. 139–142.

ЗАДОРЖНЫЙ Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Адрес для переписки: zwn@yandex.ru

КОРНАЧ Максим Анатольевич, аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Адрес для переписки: mkornach@gmail.com

ПЕНДЕР Екатерина Алексеевна, магистрант гр. ИПО-613 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: ekaterina.pender@gmail.com

ГАНЕЕВА Марина Игоревна, магистрант гр. ИПО-613 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: marina_ganeeva@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2014 г.

© В. Н. Задорожный, М. А. Корнач, Е. А. Пендер, М. И. Ганеева

ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ WEB-СЕРВЕРА ОТ АТАК ТИПА DDoS С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Рассматриваются задачи проектирования системы защиты WEB-сервера от DDoS-атак с применением аппарата нечеткой логики на основе продукционных правил вывода.

Ключевые слова: нечеткая логика, web-сервер, скрипт команд, алгоритм системы защиты.

1. Введение. Одной из наиболее актуальных на сегодняшний день тем в области защиты информации является противодействие распределенным атакам типа «отказ в обслуживании» (или DDoS-атакам). Атакам такого рода могут быть подвержены все узлы сети Интернет вне зависимости от их тематики и владельцев. Основными элементами такой сети являются web-серверы, обрабатывающие запросы на выдачу web-страниц сайта от клиентов. Наиболее часто объектами DDoS-атак становятся различные правительственные и коммерческие web-сайты, простой которых наносит значительный экономический ущерб. Задача усложняется еще и тем, что такая атака крайне проста в организации, а стопроцентного метода защиты от нее до сих пор не существует. Для организации DDoS-атаки существует множество программных средств, которые находятся в свободном доступе в сети Интернет, и даже один злоумышленник способен привести слабо защищенный web-ресурс к состоянию отказа.

Как известно [1], DDoS-атака предполагает истощение злоумышленниками ресурсов web-сервера или канала связи путем коллективной отправки со своих компьютеров бессмысленных вредоносных запросов. При этом легитимные пользователи не могут получить доступ к предоставляемым системой ресурсам (серверам) либо такой доступ затруднен.

2. Постановка задачи. В настоящее время защита от DDoS-атак организуется на уровне провайдера/датацентра, которые обладают серьезной сетевой инфраструктурой. Такая защита обычно предоставляется клиенту провайдера как сервис за дополнительную плату. Также существуют специальные сторонние компании, предоставляющие своим клиентам услуги защиты от DDoS-атак.

Защита на стороне web-сервера является менее эффективной при большом масштабе атаки, но в совокупности с системой защиты провайдера может образовать надежную двухуровневую систему защиты.

Если web-сервер находится в небольшой коммерческой организации или в каком-либо государственном учреждении, то в большинстве случаев при возникновении DDoS-атаки задача по ее устранению ложится на плечи системного администратора, который на основании своих знаний, опыта и интуиции распознает угрозу и принимает решение о мерах по ее устранению. Делая вывод, администратор изучает журнальные файлы сервера, извлекая из них полезную для себя информацию; использует различные системные утилиты по анализу сетевых пакетов и открытых сетевых портах на сервере; следит за динамикой роста файла доступа к серверу и прочее. Все эти действия занимают много времени, которое в данной ситуации критично. Зачастую несвоевременно принятое решение может привести к отказу в обслуживании сервера. Отсюда возникает задача — как в условиях неполноты и неточности исходных данных автоматизированно сделать вывод о наличии DDoS-атаки и принять решение по ее устранению. И решение такой задачи затруднительно с помощью классической теории управления и принятия решений, предполагающих нахождение точного алгоритма, используя четкие исходные данные. Поэтому для решения задач детектирования и управления, в которых исходные данные недостаточно определены или имеют сложное математическое описание в силу своей природы (а к таким задачам также относятся и задачи в области информационной безопасности) предлагается использовать аппарат нечетких множеств [2–5].

Аппарат нечеткой логики позволяет при помощи нечетких экспертных правил (т.е. знания и опыта различных экспертов) автоматизировать и ускорить процесс принятия решения, а также сделать его адаптивным для различных масштабов сети передачи данных. Метод нечетких множеств формирует лишь логику вывода и композицию различных экспертных правил для принятия итогового взвешенного решения. И чем больше экспертных

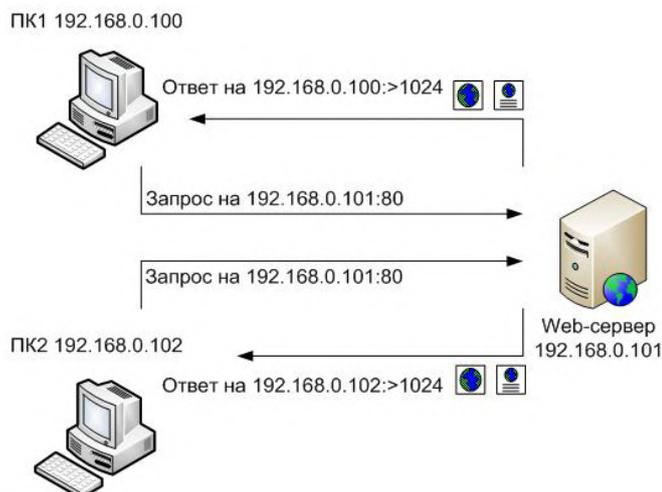


Рис. 1. Исходная модель сети (два ПК и web-сервер)

знаний обрабатывается данной системой, тем точнее будет решение и эффективнее будет система защиты.

В статье представлена система защиты от DDoS-атак, эффективность которой обеспечивается применением математического аппарата нечеткой логики [2–5], на основании которого с помощью специального алгоритма нечеткого вывода принимается решение о наличии или отсутствии атаки на web-сервер.

3. Модели СПД и WEB-сервера в системе защиты. Для проектирования и тестирования системы защиты web-сервера от DDoS-атак использовался стенд, моделирующий сеть передачи данных, состоящую из web-сервера и двух персональных компьютеров (рис. 1). Эти компьютеры являются одновременно и клиентами сервера, и организаторами атаки на него. Каждой машине в сети присваивается определенный IP-адрес.

Определим исходную модель защищаемого сервера:

1) в качестве операционной системы для web-сервера используется DebianLinux;

2) для реализации web-сервера установлена связка Apache2 + PHP5 + MySQL;

3) для функционирования и проверки работоспособности сервера создан сайт, страницы которого будут отсылаться клиентам (ПК1 и ПК2) в ответ на их запросы. Сайт состоит из нескольких страниц, написанных на языке HTML с добавлением таблиц стилей CSS. Одна из страниц будет включать форму для заполнения. При заполнении и отправке данной формы выполняется php-код, содержащий простой цикл, выводящий числа от 1 до 10000, и таблицу с версией интерпретатора PHP5. Использование такой конструкции позволит сделать сайт динамическим, задействовать на сервере интерпретатор PHP и тем самым повысить нагрузку на сервер, что позволит смоделировать реальный web-сервер с функциональным динамическим сайтом.

При отсутствии системы защиты исходная модель web-сервера является уязвимой к атакам типа DDoS в заданной модели сети. Проектируемый механизм защиты представляет собой *скрипт* команд (структурированный набор команд) на стандартном языке командного интерпретатора bash ОС DebianLinux, который, работая в фоновом режиме, будет на основе нечетких правил определять вре-

доносный трафик и фильтровать его, блокируя доступ к сайту для атакующих ПК на основании их IP-адресов. Командный интерпретатор bash позволяет производить написание программ с использованием уже готовых системных утилит ОС и удобно обрабатывать информацию, выводимую данными утилитами, что резко снижает стоимость такой системы защиты по сравнению с аналогами, а также решает проблему совместимости системы защиты с защищаемыми объектами. Также нет необходимости и в предварительном компилировании программы, т.к. интерпретатор анализирует и выполняет утверждения написанной программы одновременно, что облегчает процесс отладки программы.

Определим требования к проектируемой системе защиты:

1) сохранять работоспособность для легитимных пользователей в нормальных условиях работы и в условиях DDoS-атаки;

2) непрерывно обрабатывать нечеткие правила, самостоятельно (без вмешательства администратора), своевременно и точно реагировать на появление DDoS-атаки и устранять ее блокировкой соответствующих IP-адресов;

3) иметь возможность настройки для администратора с помощью правки соответствующих коэффициентов в нечетком выводе (возможен также вариант создания нечеткого регулятора, который бы автоматически корректировал эти коэффициенты в процессе работы программы).

4. Алгоритм работы системы защиты. Первым действием в процессе проектирования системы защиты идет создание алгоритма ее работы с применением аппарата нечеткой логики (рис. 2). Его особенностью является то, что работа алгоритма происходит в режиме непрерывного *циклирования*. Это позволяет производить постоянный мониторинг по распознаванию возникновения атаки. Еще одной особенностью является наличие порога срабатывания в начале алгоритма, который позволяет ограничить полное выполнение программного кода при явном отсутствии атаки на web-сервер.

5. Модель упрощенного нечеткого вывода. Работа алгоритма системы защиты сервера осуществляется на основании модели упрощенного нечеткого вывода Такаги-Сугено (Takagi-Sugeno), приведенной на рис. 3. Особенностью данной модели является работа в три шага и задание выходных правил

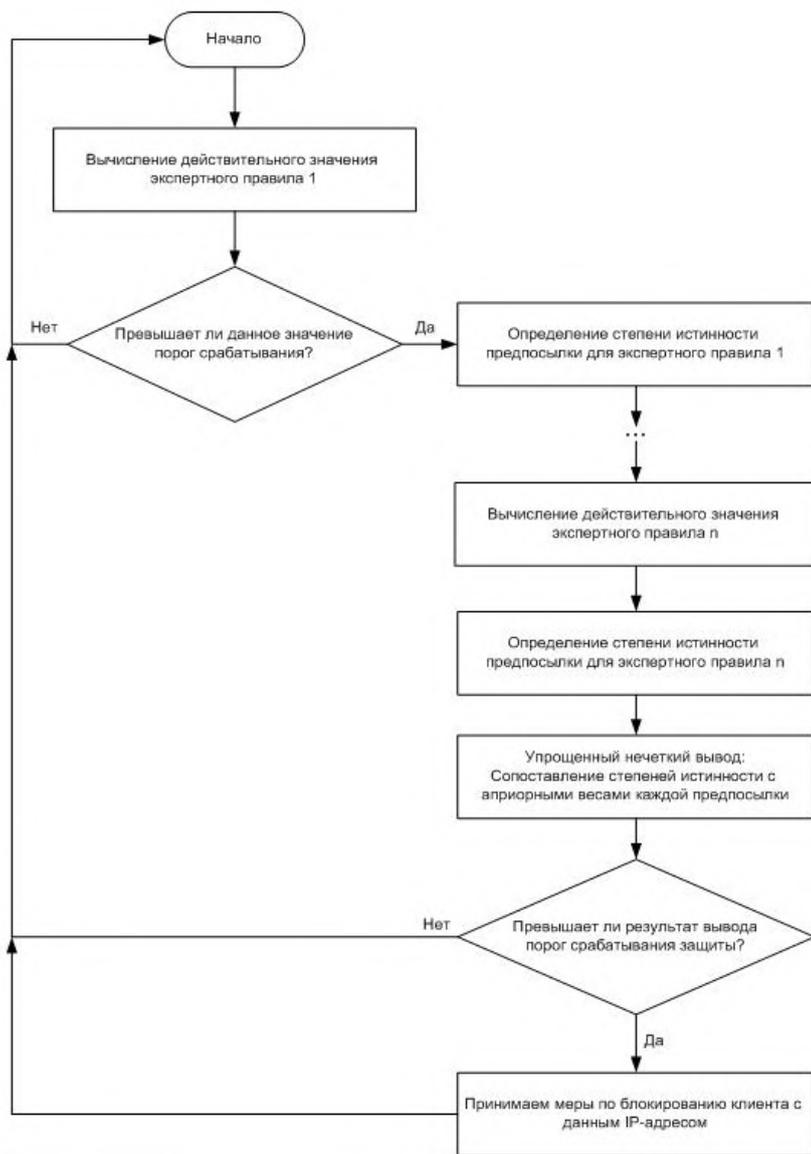


Рис. 2. Алгоритм детектирования DDoS-атаки

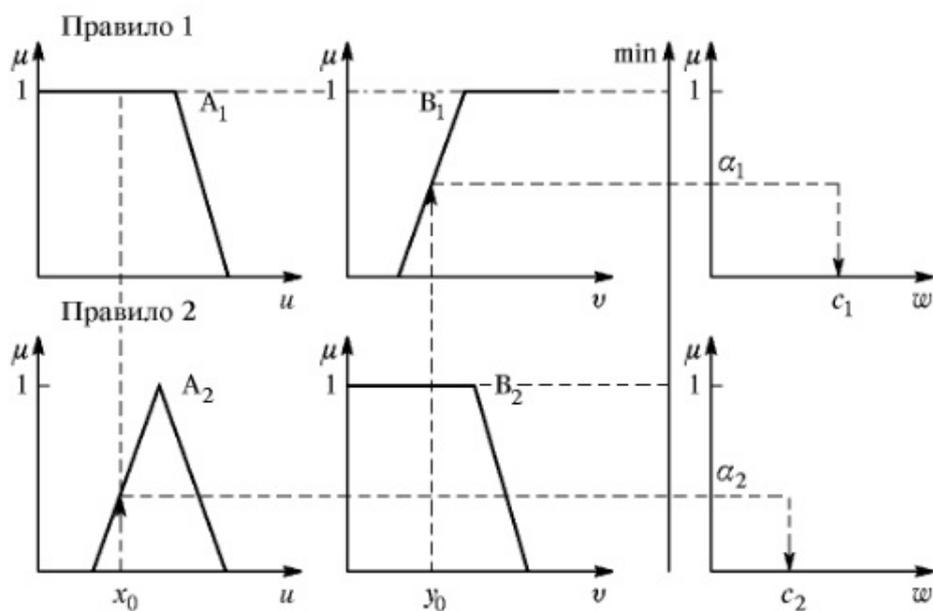


Рис. 3. Упрощенный алгоритм нечеткого вывода

с помощью четких априорных весовых коэффициентов [2, 5].

Правило 1: если x есть A_1 и y есть B_1 , тогда $z_1=c_1$;

Правило 2: если x есть A_2 и y есть B_2 , тогда $z_2=c_2$;

где c_1 и c_2 — некоторые обычные четкие числа, т.е. выходные переменные задаются в виде априорной шкалы четких чисел (вес каждого правила).

Ход алгоритма (рис. 3):

1. Fuzzification: как у алгоритма Mamdani находятся степени уверенности (процедура фаззификации) предпосылок для каждого правила $A_1(x_0)$, $A_2(x_0)$, $B_1(y_0)$, $B_2(y_0)$;

2. На втором этапе находятся значения α -уровни для каждого правила через операции \min : $\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$, $\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$;

3. Находим четкое (процедура дефаззификации) значение выходной переменной, учитывая априорную шкалу весов:

$$z_0 = \frac{a_1c_1 + a_2c_2}{a_1 + a_2}. \quad (1)$$

Поясним работу модели упрощенного нечеткого вывода на примере проектируемой системы защиты.

1. На первом этапе производится так называемое приведение к нечеткости. Делается это при помощи априорных входных функций принадлежности (ФП), например, $\mu_A(u) \in [0,1]$ рассматриваемого элемента u к нечеткому множеству A . Такая функция задается экспертом и должна как можно ближе отражать природу рассматриваемого процесса. Оси координат такой функции стандартны: по оси абсцисс — множество значений элемента, по оси ординат — степень принадлежности (от 0

до 1). За основу исходных экспертных правил для логического вывода системы защиты возьмем результаты работы двух системных утилит (такое количество правил принято для демонстрации работы алгоритма системы защиты) ОС Debian: netstat, которая показывает количество подключений к серверу с одного IP-адреса (обозначим как ПРАВИЛО 1), и ps, которая показывает количество процессов WEB-сервера (обозначим как ПРАВИЛО 2). Анализ обоих правил позволяет судить о наличии/отсутствии атаки DDoS. Поточечно построим входную функцию принадлежности для результата работы программы netstat: по оси X — количество подключений к серверу с одного IP-адреса, по оси Y — степень принадлежности к нечеткому множеству (или степень того, что данное количество подключений является DDoS-атакой). Аппроксимируем полученную функцию принадлежности квадратичным полиномом и получим готовую входную функцию для ПРАВИЛА 1 в символьном виде, которую теперь можно применять в программе (рис. 4). То же самое сделаем и для количества процессов сервера ПРАВИЛА 2 (рис. 5). Теперь для приведения конкретного значения вывода утилит netstat и ps к нечеткости необходимо лишь подставить это значение в полученную функцию и найти степень истинности каждого из соответствующих правил.

2. На втором этапе выполняется нечеткий вывод, т.е. находится минимум среди всех предпосылок каждого правила. В нашем случае каждое правило имеет только одну предпосылку, то она и будет выбрана как минимальная.

На третьем этапе производится композиция полученных значений истинности с априорно заданными весами для каждого из правил (от 0 до 1).

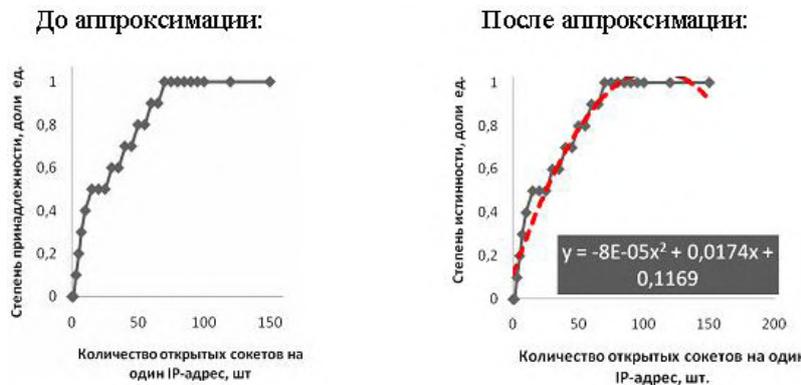


Рис. 4. Формирование входной ФП для ПРАВИЛА 1

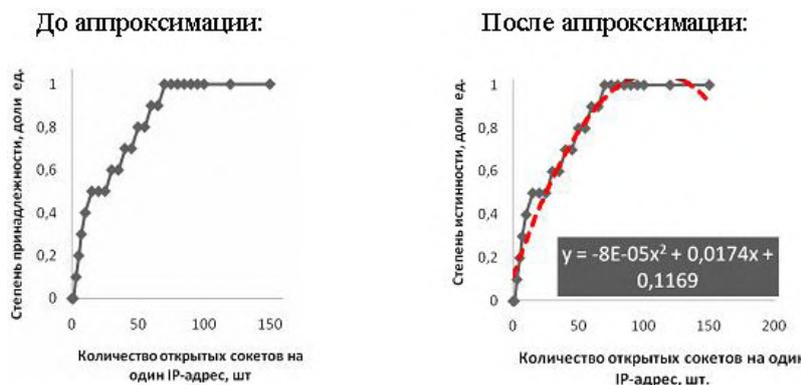


Рис. 5. Формирование входной ФП для ПРАВИЛА 2

```
#!/bin/bash
while true
do
netstat -ntu | awk '{print $5}' | grep -e "[^(a-z)]" | cut -d: -f1 | uniq -c >
okoddos.log
link=$(awk '{print $1}' okoddos.log)
ip=$(awk '{print $2}' okoddos.log)
if [ "$link" != "40" ]
then
proc=$(ps -u www-data | wc -l)
al1=$(echo "scale=5; -8*10^(-
5)*($link)^2)+0.0174*($link)+0.1169" | bc -l)
al2=$(echo "scale=5; -1*10^(-4)*($proc)^2)+0.02*($proc)-
0.0046" | bc -l)
ddos=$(echo "scale=2; (($al1)*0.8+($al2)*0.7)/(($al1)+($al2))" | bc -l)
if [ "$ddos" != ".75" ]
then
iptables -A INPUT -s $ip -j DROP
fi
fi
done
```

Рис. 6. Полный листинг скрипта команд для защиты web-сервера от DDoS-атаки

Задание веса каждому правилу позволяет присваивать степень важности тому или иному правилу. Такие веса должны подстраиваться в результате тестирования системы защиты. Для нашей модели ПРАВИЛО 1 имеет вес = 0,8, а ПРАВИЛО 2 — вес = 0,7. Данные веса были выбраны субъективно на основании баланса между быстротой срабатывания системы защиты и точностью (безошибочностью) детектирования атаки. Композиция производится по дискретной формуле *центрального* метода приведения к четкости (дефазсификация) по выражению (1).

Полученное взвешенное значение композиции двух экспертных правил для детектирования DDoS-атаки сравниваем с пороговым значением срабатывания системы защиты. Если данный порог будет превышен — применяются меры по блокировке соответствующего ПК по его IP-адресу с помощью встроенного в ОС межсетевое экрана. Данный порог также должен быть настраиваемым, исходя из баланса между быстротой и точностью срабатывания.

6. Создание скрипта команд. Вторым действием в процессе проектирования системы защиты идет написание кода *скрипта* команд [6]. На рис. 6 приведен итоговый код полученного *скрипта* для командного интерпретатора bash ОС DebianLinux на примере использования двух экспертных правил (ПРАВИЛА 1 и ПРАВИЛА 2).

7. Заключение. На основании созданного алгоритма (рис. 2) скрипт команд может быть дополнен рядом дополнительных экспертных правил, которые значительно улучшат ее эффективность. Улучшение системы защиты возможно также путем применения модульного принципа построения программы. При этом каждое правило будет обрабатываться

отдельным процессом на сервере с возможностью включения или отключения отдельных процессов, а математический нечеткий анализ будет выполняться корневым процессом путем передачи в него значений соответствующих переменных. Возможно также применение более сложной модели нечеткого вывода [2, 5], предусматривающей вместо выходных априорных весов для правил — выходные функции принадлежности; и упрощение настройки системы защиты путем создания понятного интерфейса для оператора.

Таким образом, в совокупности с системой защиты на стороне провайдера, созданное программное средство системы защиты web-сервера представляет собой эффективное и полнофункциональное решение по защите от DDoS-атак, созданное на основе перспективного, на сегодняшний день, математического аппарата нечеткой логики и демонстрирующее готовность к коммерческому применению при соответствующих доработках.

Библиографический список

1. Касперски, Крис. Компьютерные вирусы изнутри и снаружи / Крис Касперски. — СПб. : Питер, 2006. — 527 с.
2. Бычков, Е. Д. Математические модели управления состояниями цифровой телекоммуникационной сети с использованием теории нечетких множеств / Е. Д. Бычков. — Омск : ОмГТУ, 2010. — 236 с.
3. Бычков, Е. Д. Защита WEB-сервера от атак типа DDoS на основе модели нечеткого вывода / Е. Д. Бычков, В. В. Кладов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — М., 2013. — № 5 (52). — С. 44—49.
4. Бычков, Е. Д. Модель защиты WEB-сервера от несанкционированных атак на основе нечеткой логики / Е. Д. Бычков, В. В. Кладов // Россия молодая : передовые технологии в промышленность : материалы V Всерос. науч.-техн. конф., 12—14 ноября. — Омск : ОмГТУ, 2013. — Кн. 1. — С. 193—196.
5. Борисов, В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федюлов. — М. : Горячая линия-Телеком, 2007. — 284 с.
6. Маслаков, В. Г. Самоучитель. Linux / В. Г. Маслаков. — СПб. : Питер, 2008. — 308 с.

МАЙСТРЕНКО Василий Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета.

БЫЧКОВ Евгений Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

КЛАДОВ Владимир Владимирович, аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность» ОмГУПС.

Адрес для переписки: bychkov_ev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.10.2014 г.

© В. А. Майстренко, Е. Д. Бычков, В. В. Кладов

НОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВА КРИТЕРИЕВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Выполнена нормализация четырехмерного пространства критериев качества схем расположения объектов производственных комплексов. Введены нормализующие коэффициенты, позволяющие представить гиперпространство критериев близким к единичному гиперкубу.

Ключевые слова: схема расположения объектов, критерии качества схем, нормализующие коэффициенты, единичный гиперкуб.

Одними из основных критериев оценки качества схем расположения объектов производственных комплексов различных отраслей промышленности, таких как нефтегазоперерабатывающая, машиностроительная и другие, являются затраты на реализацию коммуникационных связей между объектами, площадь, габариты и периметр территории, занимаемой этими объектами [1–4]. Названные критерии качества схем расположения объектов имеют разные размерности, принимаемые ими значения могут значительно отличаться друг от друга. В связи с этим при многокритериальной оптимизации схем размещения объектов по перечисленным выше критериям необходимо провести их нормализацию, которая в данном случае должна быть сведена к получению таких значений каждого из критериев, которые бы были сопоставимы со значениями других. Кроме того, нормализация пространства критериев необходима для накопления опыта разработчиков и создания соответствующей базы данных.

Одним из способов обеспечения сопоставимости критериев является перевод их в относительную (безразмерную) форму путем деления на некоторую опорную (базовую) величину той же размерности. Выбор значения этой величины, как правило, субъективен и подчинен желанию свести возможные изменения относительных значений критериев в установленный диапазон. В нашем случае будем стремиться приводить относительные критерии к значениям, близким к единице. Однако строгой границы интервалов изменения значений критериев, выраженных в относительной форме, устанавливать не будем, так как в каждой задаче оптимизации опорные значения критериев, которые можно принять для нормализации критериев, заранее не известны.

При нормализации четырех перечисленных выше критериев будем иметь в виду, что крите-

рий F , характеризующий площадь, измеряется в m^2 , а критерии P и G , оценивающие соответственно периметр и габариты, — в метрах. Критерий C , относящийся к коммуникационным затратам, может в нашем случае быть измерен либо в стоимостных единицах, например в рублях, при стоимостном выражении удельных затрат c , руб $\cdot m^{-1}$ (затрат на погонный метр), либо быть безразмерным при выражении удельных затрат в некоторой предварительно принятой безразмерной балльной системе — c , $1\cdot m^{-1}$.

Для нормализации критерия C , характеризующего затраты на реализацию коммуникационных связей между объектами, будем использовать коэффициент нормализации k_c этого критерия, равный некоторому идеальному значению критерия C , которое он может принять в случае, когда все объекты находятся друг от друга точно на минимально допустимом расстоянии. Такое значение критерия C не всегда достижимо в принципе. Нетрудно показать, что даже в самых простейших схемах возможные сочетания регламентированных минимально допустимых расстояний, при которых их одновременное выполнение невозможно. Тем не менее такое идеальное значение критерия C вполне может быть принято в качестве опорного для его нормализации.

Для расчета коэффициента нормализации критерия затрат будем использовать следующую формулу:

$$k_c = \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{j=i+1}^{j=n} c_{ij} d_{ij}, \quad (1)$$

где d_{ij} — регламентированное минимально допустимое расстояние между i -м и j -м объектами, измеряемое в метрах; c_{ij} — удельные затраты на реализацию коммуникационных связей между i -м и j -м объектами, выражаемые, как отмечалось, либо в руб $\cdot m^{-1}$, либо в $1\cdot m^{-1}$; n — число объектов.

Из формулы (1) видно, что размерность коэффициента нормализации k_c и критерия C будут совпадать при любом из принятых способов оценки удельных затрат. Такое совпадение размерностей величин k_c и C обеспечит в дальнейшем безразмерность относительного критерия C_o , характеризующего коммуникационные затраты между объектами.

Отметим, что если все дополнительные условия синтеза схем по регламентированным минимально допустимым расстояниям между объектами в принципе выполнимы, то минимально возможное значение нормализованного критерия коммуникационных затрат будет в точности равно единице. В общем случае этот критерий может принимать значения, равные единице или большие единицы.

При нормализации критерия F , характеризующего площадь территории, занимаемой объектами, следует иметь в виду, что минимальное значение этого критерия при принятых в работе [1] допущениях равно нулю. Это соответствует такому положению объектов, при котором центры их геометрических образов расположены на одной прямой. Несмотря на то что минимум этой частной критериальной функции известен априори, проблема поиска оптимального расположения объектов не является тривиальной в связи с тем, что при размещении центров геометрических образов объектов на одной прямой должен быть выполнен ряд дополнительных условий, в частности, по минимально допустимым расстояниям между объектами. При условии, что площадь территории, занимаемой объектами, измеряется в m^2 , значения этого критерия в зоне, далекой от расположения оптимума, может быть заметно большим по сравнению со значениями других критериев.

В качестве коэффициента k_f нормализующего критерий F , следует принять такое целое значение, которое было бы близко к предполагаемой реальной площади проектируемого производственного комплекса. В частности, величине k_f можно придавать значения из ряда: 10 000 m^2 , 20 000 m^2 и так далее. В этом случае в ходе минимизации относительного критерия, характеризующего площадь, он в окрестностях оптимума, приближаясь к минимально возможному нулевому значению, будет принимать значения, близкие к единице и, следовательно, сопоставимые в названной окрестности с нормализованными значениями других критериев, выраженных в относительных единицах. В проводимых нами исследованиях в качестве основного опорного значения площади примем 10 000 m^2 , следовательно,

$$k_f = 10\,000\, m^2.$$

Такое значение коэффициента k_f обосновывается, кроме того, и тем, что в качестве предварительной (начальной) территории расположения объектов может быть принят квадрат площадью 100 м × 100 м.

Принятая квадратная территория начального расположения объектов дает основания и для выбора коэффициентов нормализации критериев P и G , характеризующих соответственно периметр и габариты.

Коэффициент нормализации k_p периметра P примем равным периметру начального квадрата, то есть

$$k_p = 400\, m.$$

Имея в виду размеры начального квадрата и учитывая то обстоятельство, что при минимизации размеров территории, занимаемой объектами,

выпуклый многоугольник, охватывающий центры геометрических образов объектов в плане, стремится вписаться в окружность [1], целесообразно в качестве коэффициента k_g , нормализующего критерий G , принять значение численно несколько большее длины диагонали начального квадрата, а именно:

$$k_g = 200\, m.$$

Приведем в общем виде зависимости для расчета нормализованных значений C_o , S_o , P_o и G_o четырех упомянутых выше критериев C , F , P и G качества схем расположения объектов производственных комплексов:

$$C_o = C/k_c, \quad F_o = F/k_f, \quad P_o = P/k_p, \quad G_o = G/k_g.$$

Если проектировщик в качестве значений коэффициентов нормализации критериев F , P и G примет рекомендованные значения, то представленные выше формулы для расчета величин F_o и G_o запишутся в следующем виде:

$$F_o = F/10000, \quad P_o = P/400, \quad G_o = G/200.$$

На основании изложенного можно сформировать критериальную функцию Z для многокритериальной оптимизации схем расположения объектов производственных комплексов в следующем виде:

$$Z = k_{cv} C_o + k_{fv} S_o + k_{pv} P_o + k_{gv} G_o,$$

где k_{cv} , k_{fv} , k_{pv} и k_{gv} — весовые коэффициенты частных критериальных функций соответственно C , F , P и G .

Решение ряда тестовых задач подтвердило правильность принятого подхода к выбору коэффициентов нормализации.

Покажем это на примере.

Пусть заданы: размеры a и b геометрических образов (прямоугольников) объектов в плане соответственно в направлении оси абсцисс и в направлении оси ординат локальной системы координат (табл. 1), уровни с удельных коммуникационных затрат (табл. 2) и регламентированные минимально допустимые расстояния d между i -м и j -м объектами на просвет (табл. 3). Назначим координаты начального расположения центров геометрических образов объектов x и y (табл. 4).

Таблица 1

Размеры геометрических образов объектов в плане, м

№ объектов	1	2	3	4	5
a	40	20	60	40	30
b	20	20	40	40	10

Таблица 2

Удельные коммуникационные затраты с, руб./м

i/j	1	2	3	4	5
1	—	2	20	15	1
2	—	—	1	18	16
3	—	—	—	5	10
4	—	—	—	—	3

Таблица 3

Регламентированные минимально допустимые расстояния d между объектами, м

i / j	1	2	3	4	5
1	–	70	100	110	60
2	–	–	45	150	130
3	–	–	–	80	95
4	–	–	–	–	20

Таблица 4

Координаты x и y начального расположения центров геометрических образов объектов, м

№ объектов	1	2	3	4	5
x	80	60	110	140	120
y	100	130	150	125	90

Таблица 5

Координаты x и y оптимизированного расположения центров объектов, м

№ объектов	1	2	3	4	5
x	68,53	19,82	92,64	211,08	165,41
y	32,70	127,95	189,27	106,77	61,70

При принятых исходных данных: $k_c = 1,436 \cdot 10^4$ руб.; $C = 5,829 \cdot 10^3$ руб.; $F = 2,875 \cdot 10^3$ м²; $P = 210,501$ м; $G = 80,156$ м.

В результате оптимизационного поиска получена схема расположения объектов с координатами их центров, представленными в табл. 5.

В полученной оптимизированной схеме критерии качества приняли следующие значения:

$C = 1,439 \cdot 10^4$ руб.; $F = 1,675 \cdot 10^4$ м²; $P = 511,811$ м; $G = 192,426$ м (увеличение значений критериев объясняется тем, что в принятом исходном положении не выполнялись требования по регламентированным минимально допустимым расстояниям между объектами на просвет, а в полученном оптимизированном решении они выполнены для всех пар объектов с достаточно высокой точностью).

Нормализованные значения критериев при исходном расположении объектов и после оптимизационного поиска равны соответственно: $C_o = 0,405$, $S_o = 0,287$, $P_o = 0,526$, $G_o = 0,401$ и $C_o = 1,000$, $S_o = 1,675$, $P_o = 1,280$, $G_o = 0,962$.

Из сравнения полученных значений критериев в относительной форме видно, что эти значения вполне сопоставимы как до решения оптимизационной задачи, так и после.

Выше нормализация пространства критериев производилась применительно к абсолютным системам координат. Следует заметить, что предложенный подход может быть использован и для нормализации критериев в пространстве относительно линейных размеров и координаты перевести в относительные единицы [1], оставив без изменения два возможных варианта исходной размерности удельных коммуникационных затрат.

В заключение можно отметить, что полученный подход к нормализации критериев обеспечивает достаточную их сопоставимость и может быть использован при многокритериальной оптимизации схем расположения объектов производственных комплексов, как при использовании абсолютных систем координат, так и с использованием относительных.

Библиографический список

1. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации занимаемой ими площади / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2011. – № 2 (90). – С. 163–167.
2. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации коммуникационных затрат / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2009. – № 3 (83). – С. 96–99.
3. Зуга, И. М. Проектирование схем размещения объектов из условия минимизации габаритных размеров занимаемой территории / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко. – Омск, 2009. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 13.05.2009, № 425-B2009.
4. Зуга, И. М. Проектирование схем размещения объектов из условия минимизации периметра занимаемой ими территории / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко. – Омск, 2009. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ 13.05.2009, № 348-B2009.

ЗУГА Игорь Михайлович, кандидат технических наук, член Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации.

Адрес для переписки: zugaim.2012@gmail.com

ХОМЧЕНКО Василий Герасимович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой автоматизации и робототехники Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: v_khomchenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.12.2014 г.

© И. М. Зуга, В. Г. Хомченко

НОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВА СВОБОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОПТИМИЗАЦИОННОМ СИНТЕЗЕ СХЕМ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ КООРДИНАТ

Предлагается вести оптимизацию схем взаиморасположения объектов производственных комплексов в нормализованном пространстве свободных параметров с использованием локальных систем координат. Приведены два способа нормализации, обеспечивающие переход к безразмерным (относительным) параметрам синтеза схем.

Ключевые слова: схемы размещения объектов, оптимизационный синтез, нормализация параметров, локальные системы координат.

Синтез схем расположения объектов тесно связан с проектированием генеральных планов производственных комплексов и выполняется итерационно в несколько этапов. Важным является начальный этап проектирования в прединвестиционный период, когда приходится принимать решения в условиях большой неопределенности и дефицита времени и когда необходимо достаточно быстро получить достоверную оценку требуемых инвестиций.

Свободными параметрами синтеза схем размещения объектов при незадаанных предварительно местах их взаимного размещения являются координаты x_i и y_i ($i = 1, \dots, n$) центров геометрических образцов объектов в плане (окружностей или прямоугольников) [1–4], измеряемые в единицах длины (здесь: n — число объектов).

Синтез схем расположения объектов можно вести как в абсолютных, так и в некоторых определенных образом организованных относительных локальных системах координатах. Однако, с нашей точки зрения, принципиальные решения в задаче о взаиморасположении объектов следует принимать именно в относительных локальных координатах, поскольку решение оптимизационной задачи в абсолютных координатах оказывается избыточно жестко привязанным к случайным образом принятому набору начальных значений свободных параметров синтеза схем. Поэтому, в общем алгоритме системы автоматизации проектирования схем расположения объектов, в качестве начального этапа синтеза схем должен быть предусмотрен оптимизационный поиск взаиморасположения объектов

именно в относительных локальных координатах. Данная работа посвящена вопросам перевода синтеза схем расположения объектов производственных комплексов из пространства абсолютных параметров в пространство их относительных (нормализованных) значений.

Использование абсолютных координат целесообразно на заключительном этапе проектирования, когда решены основные проблемы размещения объектов относительно друг друга или когда внешние дополнительные ограничения затруднительно представить в относительной локальной системе координат.

Положение проектируемой производственной системы и, в частности локальной системы координат, относительно иерархически более высокой производственной системы или относительно абсолютных (геодезических) координат можно затем рассчитать исходя из некоторых других дополнительных условий с использованием известных способов преобразования координат.

Важно отметить, что каких-либо принципиальных отличий в подходах синтеза схем расположения объектов как в абсолютных, так и в относительных координатах нет. С той разницей, что синтез в относительных системах координат позволяет более широко рассмотреть проблему и создавать соответствующую базу данных, в частности, базу данных определенных типовых решений.

В рамках решаемой в данной статье задачи заменим понятие «синтез схем расположения объектов» понятием «синтез схем взаиморасположения

объектов». Такая замена позволяет без потери содержательной части задачи перейти к некоторой абстрактной локальной системе координат, в которой можно использовать нормализованные (относительные) свободные параметры синтеза схем — относительные координаты центров геометрических образов объектов.

В связи с изложенными выше соображениями начальный этап поиска оптимальной схемы взаиморасположения объектов целесообразно вести именно в некоторой локальной системе координат, связанной тем или иным образом с объектами данного предприятия либо назначенной совершенно произвольно. Кроме того, вполне допустимо и целесообразно производить оптимизацию в пространстве относительных значений свободных параметров синтеза схем.

Как правило, при нормализации пространства свободных параметров синтеза стремятся вероятный диапазон изменения параметров заключить в единичный гиперкуб. В условиях решаемой в данной работе задачи и с учетом опыта разработчиков генпланов целесообразно, на наш взгляд, при переходе к относительным значениям параметров использовать диапазон изменения параметров, близкий к привычному для проектировщиков. В связи с этим проектирование схем взаиморасположения объектов будем вести в окрестностях гиперкуба со сторонами, равными 100 относительным единицам. Следует заметить, что, благодаря однотипности в решаемой задаче свободных параметров синтеза, которыми являются координаты центров геометрических образов объектов, гиперкуб свободных параметров можно свернуть, в нашем случае, в плоский нормализованный квадрат со сторонами, равными 100 относительным единицам. Это обстоятельство позволяет вести решение задачи оптимизации схем взаиморасположения объектов в двумерной относительной декартовой системе координат.

Для определенности расположим нормализованный квадрат в первом квадранте относительной системы координат так, что его вершины находятся в точках с координатами: (0;0), (100;0), (0;100) и (100;100), а начальное решение оптимизационной задачи, получаемое тем или иным способом, всегда будет назначать в окрестностях этого квадрата.

Принятый подход объясняется кроме прочего еще и тем, что рекомендуемая область синтеза схем, выражаемая в относительных единицах, будет интуитивно ассоциироваться у проектировщика с реальной территорией размером 100 м × 100 м.

В ходе решения задачи о взаиморасположении представим геометрические образы объектов в плане в первом приближении либо в виде прямоугольников, либо в виде окружностей [1–4].

Переход от абсолютных к относительным (нормализованным) значениям линейных параметров, используемым в ходе синтеза схем (расстояния на просвет между объектами, размеры объектов в плане и др.), будем производить путем деления их на принятый нормирующий коэффициент m , измеряемый в метрах.

Выбор значения нормирующего коэффициента m целесообразно связать с наиболее устойчивым (доминирующим) параметром в задаче синтеза схем (таковым в общем случае можно считать наибольшее из регламентированных минимально допустимых расстояний между объектами на просвет). Кроме того, этот выбор должен обеспечить значение величины m такой, чтобы относительное значение

расстояний между центрами геометрических образов объектов, минимально допустимое расстояние на просвет между которыми максимально, было равно или близко к 100 относительным единицам.

В частности, можно принять

$$m = d/100,$$

где

$$d = d_{\max} + 0,5(a_{d1} + a_{d2}); \quad (1)$$

d_{\max} — максимальное из регламентированных минимально допустимых расстояний между объектами на просвет, m ; a_{d1} , a_{d2} — абсолютные размеры в направлении оси абсцисс геометрических образов объектов в плане, расстояние на просвет между которыми равно d_{\max} м.

Тогда относительные размеры объектов (длина и ширина или радиус окружности их геометрических образов в плане, относительные координаты центров геометрических образов объектов и другие линейные параметры синтеза будут рассчитываться по формуле

$$l_i^o = l_i^a/m,$$

где l_i^o и l_i^a — соответственно относительное и абсолютное значения i -го линейного параметра объектов, габаритных размеров объектов в плане и при необходимости.

После нормализации минимально допустимых расстояний между другими линейными параметрами, назначаемыми и рассчитываемыми в ходе оптимизации, координаты расположения центров геометрических образов объектов следует трактовать тоже как относительные в локальной системе координат.

Для обратного перехода к абсолютным значениям координат и других параметров синтеза достаточно умножить соответствующие относительные значения на принятое значение нормирующего коэффициента. Пересчет же значений координат из локальной системы в систему координат, связанную с иерархически более высокой производственной структурой, требует соответствующего преобразования координат.

При проектировании схем расположения объектов предприятий необходимо иметь в виду, что к выбору направления осей локальной системы координат можно подойти двояко: их можно назначить либо произвольно, так как кратчайшее расстояние между объектами инвариантно к расположению осей координат, либо совпадающими с предварительно принятыми направлениями коммуникаций или осями некоторой глобальной системы координат.

Изложенная выше процедура приведения линейных параметров синтеза к безразмерному относительному виду является общей для оптимизационного синтеза схем по любому из возможных критериев качества [1–4].

Одним из важнейших критериев качества схем являются затраты на реализацию коммуникационных связей между объектами [2]. Учитывая особенности синтеза схем по этому критерию качества можно использовать специальный метод приведения их к нормализованному квадрату.

Большое влияние на ход оптимизационного синтеза схем по критерию коммуникационных затрат имеет начальное взаиморасположение центров геометрических образов той пары (тех пар) объектов, удельные коммуникационные затраты между

которыми максимальны. Одному из объектов этой пары (этих пар) присвоим номер 1, а другому — номер 2. Присваивание номеров остальным объектам можно производить произвольно и не связывать с какими-либо их свойствами или с отношениями к другим объектам.

Для обеспечения сопоставимости результатов исследований и формирования в последующем соответствующей базы данных назначим в относительной локальной системе координат начальное положение центра геометрического образа 1-го объекта из этой пары (этих пар) в точке с координатами (0; 50), а 2-го — в точке с координатами 100; 50.

Определение координат начального положения центров геометрических образов остальных $n-2$ объектов можно осуществлять различными способами: на основе опыта разработчика, на основе имеющейся базы данных, с использованием генераторов случайных чисел либо как-то иначе (здесь: n — число объектов).

В этом случае нормирующий коэффициент m может быть рассчитан по формуле, аналогичной (1), при условии, что

$$d = d_{12} + 0,5 (a_1 + a_2),$$

где: d_{12} и a_1, a_2 — соответственно регламентированное минимальное допустимое расстояние между 1-м и 2-м объектами и размеры этих объектов в направлении оси абсцисс, выраженные в метрах.

Расположив один из объектов пары (пар) с максимальными удельными затратами в точке с координатами (0; 50), а другой — в точке с координатами (100; 50), в дальнейшем синтез схем можно вести двумя разными способами.

Первый способ заключается в том, что координаты объектов, принятых за 1-й и 2-й, в ходе синтеза не меняются, а оптимизация схем ведется за счет поиска мест расположения оставшихся $n-2$ объектов. Такой подход обеспечивает более строгую сопоставимость результатов исследований, и именно при таком подходе можно получить стабильные материалы для формирования базы данных. Это обстоятельство позволяет, кроме того, сократить размерность задачи на четыре свободных параметра. Однако, как показали численные эксперименты, фиксированное «неподвижное» положение двух объектов в ходе синтеза в некоторых случаях ухудшает сходимость вычислительного процесса и затрудняет поиск оптимальных по критерию коммуникационных затрат схем взаиморасположения объектов.

Во втором предлагаемом способе и 1-й, и 2-й объекты, как и все остальные, получают возможность ухода из начального положения и смены его в ходе оптимизации в соответствии с принятым методом минимизации целевой функции.

В этом случае накапливаемые материалы будут более «размыты» и потребуют создания базы данных, отличной от базы данных, полученной при первом подходе. К преимуществам этого подхода можно отнести то, что получаемая в этом случае база данных будет создана в более характерных («естественных») для известных методов оптимизации условиях с улучшенной сходимостью вычислительного процесса.

В заключение отметим, что предложенный в данной работе переход к некоторой абстракт-

ной, имеющей статус локальной системе координат и нормализация параметров дают возможность: во-первых, абстрагироваться от факторов, которыми можно пренебречь на начальном этапе синтеза схем взаиморасположения объектов производственных комплексов, во-вторых, получить достаточно большое число альтернативных вариантов и, в-третьих, он дает возможность локализовать в относительной системе координат получаемые оптимизационные решения в окрестностях первого квадранта (в окрестностях квадрата с центром в точке с координатами (50; 50)), что, в свою очередь, позволяет исследовать рельеф целевых функций на регулярной основе и в значительной степени упорядочить и систематизировать результаты исследований. Заметим также, что целью нормализации пространства свободных параметров синтеза схем является не строгое сведение этого пространства к нормирующему квадрату — достаточно, чтобы процесс оптимизации происходил в окрестностях этого квадрата.

Важным доводом в пользу применения в локальной системе координат относительных единиц является также общность получаемых результатов исследований. Это позволит целенаправленно накапливать сведения о характерных особенностях рельефа целевых функций для типовых проектных ситуаций, используя определенные тестовые примеры и в последующем сформировать базу данных по оптимизационному автоматизированному проектированию схем расположения объектов по соответствующим критериям.

Библиографический список

1. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации занимаемой ими площади / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 2 (90). — С. 163–167.
2. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации коммуникационных затрат / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2009. — № 3 (83). — С. 96–99.
3. Зуга, И. М. Проектирование схем размещения объектов из условия минимизации габаритных размеров занимаемой территории / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко. — Омск, 2009. — 7 с. — Деп. в ВИНТИ 13.05.2009, № 425-B2009.
4. Зуга, И. М. Проектирование схем размещения объектов из условия минимизации периметра занимаемой ими территории / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко. — Омск, 2009. — 8 с. — Деп. в ВИНТИ 13.05.2009, № 348-B2009.

ЗУГА Игорь Михайлович, кандидат технических наук, член Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации.

Адрес для переписки: zugaim.2012@gmail.com

ХОМЧЕНКО Василий Герасимович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой автоматизации и робототехники Омского государственного технического университета.

Адрес для переписки: v_khomchenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.12.2014 г.

© И. М. Зуга, В. Г. Хомченко

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧАСТИЧНОГО ПОРЯДКА И КОМБИНАТОРИКИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДРОСТКОВОЙ ОДЕЖДЫ ПОСРЕДСТВОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ

В статье описан метод частичного порядка, который позволит оптимизировать процесс проектирования подростковой одежды и найти лучший комплект из комбинаторных геометрических элементов; сформулирован критерий оптимизации; разработана последовательность нахождения наилучшего результата за счет применения частично упорядоченных множеств.

Ключевые слова: метод частичного порядка, подростковый гардероб, автоматизация проектирования, комбинаторные сочетания, базовый элемент изделия.

Введение. В настоящее время решение прикладных математических задач активно используется для усовершенствования способов разработки новых систем автоматизированного проектирования, обеспечивающих удовлетворенность подросткового населения недорогой многофункциональной одеждой. Математическими методами, способными хорошо адаптироваться в информационной среде САПР, являются методы комбинаторики, а применение частичного порядка в комплексе с комбинаторикой позволит найти новые средства для оптимизации процесса проектирования комплектов подростковой одежды [1, 2]. Как именно реализуются данные методы в проектирующих процессах и автоматизации, описано в данной статье.

1. Описание метода частичного порядка применительно к поиску оптимального решения для проектирования. Метод частичного упорядочения, который используется в процессе проектирования комплектов одежды, неразрывно связан с комбинаторными методами проектирования.

Одним из основных принципов комбинаторики является принцип умножения. Суть его заключается в следующем: если существует возможность сделать выбор какого-либо элемента n -способами, и затем другого элемента, комбинируемого с ним, n_2 -способами, третьего n_3 -способами и т. д., то общее количество всевозможных комбинаций N равно:

$$N = n_1 \times n_2 \times n_3 \times n_k, \quad (1)$$

где n — количество способов выбора k -го геометрического элемента; k — количество элементов в комплекте.

Подсчет количества комбинаций необходим для того, чтобы автоматизированная система, пользуясь им, предоставляла пользователю возможность выявить оптимальное соотношение количества элементов и изделий в гардеробе.

При формировании гардероба используются готовые наборы комбинаторных геометрических элементов и осуществляется поиск наилучшего набора путем целенаправленного перебора по заданному алгоритму. На множестве наборов геометрических элементов задается частичный порядок [3, 4].

Таким образом, сравнивая два элемента множества, можно определить больший (наиболее удачный) порядок.

Порядком, или частичным порядком, на множестве M называется бинарное отношение φ на M (определяемое некоторым множеством $R_\varphi \subset M \times M$), удовлетворяющее условиям рефлексивности, транзитивности и антисимметричности [4].

Пусть есть частично упорядоченное множество $M \subset P \times K$:

$$M = \{(a; b) \mid a \in P, b \in K, P \subset N, K \subset N\}, \quad (2)$$

где a и b — элементы множества, a — изделия; b — комбинаторные геометрические элементы изделий; N — множество натуральных чисел; K, P — подмножества N ; $K \cong [1; k], P \cong [1; p]$ [5].

$$M = \{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_k, b_k)\}. \quad (3)$$

Определим отношение φ на множестве M :

$$(a_1, b_1)\varphi(a_2, b_2) \stackrel{def}{\Leftrightarrow} (a_1 = a_2, b_1 < b_2) \vee (b_1 = b_2, a_1 > a_2). \quad (4)$$

При сравнении пары $(a; b)$ определяется оптимальное, наиболее удачное отношение количества комбинаторных геометрических элементов к количеству изделий в гардеробе. Из формулы (4) видно, что сравнение может происходить в двух вариантах:

1. При равном количестве изделий $(a_1 = a_2)$ сравнивается количество комбинаторных геометрических элементов. Наилучшим считается вариант, где количество элементов будет наименьшим, то есть $b_1 < b_2$.

2. При заданном количестве комбинаторных геометрических элементов $(b_1 = b_2)$ сравнивается количество получаемых изделий. Наилучшим считается вариант с наибольшим количеством изделий, то есть $a_1 > a_2$.

Пусть $\alpha = (a, b) \in M$. Условия рефлексивности, транзитивности и антисимметричности выполняются:

$$\forall \alpha \in M \alpha \alpha;$$

$$\forall \alpha, \beta, \gamma \in M (\alpha \beta) \wedge (\beta \gamma) \Rightarrow \alpha \gamma;$$

$$\forall \alpha, \beta \in M (\alpha \beta) \wedge (\beta \alpha) \Rightarrow \alpha = \beta.$$

Задание частичного порядка позволяет осуществить целенаправленный перебор для поиска оптимального варианта. Сначала необходимо задать определенное количество элементов в гардеробе, например, $b_1 = 18$. Получаем блок наборов элементов, упорядоченных относительно операции частичного порядка от меньшего количества изделий к большему, при $b_1 = 18$. Будем считать, что лучше тот, который больше. Далее из блока выбираем набор с максимальным количеством изделий атах, получаемых из этого набора элементов. Затем задается другое количество элементов, ближайшее к первоначальному в меньшую сторону $b_2 = (b_1 - 1)$, в данном случае $b_2 = 17$. Причем заданное меньшее количество деталей означает объединение каких-либо деталей из существующих в комплекте. В случае, если при новом заданном количестве элементов получается то же самое количество изделий a_{max} , то этот набор является лучшим, то есть наиболее оптимальным. Аналогично можно двигать-

ся и в обратном направлении, то есть $b_2 = (b_1 + 1)$. В этом случае наблюдается значительное увеличение количества изделий в гардеробе из этого комплекта деталей, то есть некий скачок, при добавлении одного или нескольких элементов в комплект. Так можно найти оптимальный комплект.

Частично упорядоченное множество предполагает возможность существования несравнимых элементов [4].

При равном количестве изделий наборы, имеющие одинаковое количество элементов, но различные по структуре составляющих их элементов считаются несравнимыми.

В результате целенаправленного перебора в качестве оптимального решения может возникнуть не единственный комплект деталей, а несколько комплектов, одинаковых по количеству деталей и одинаковых по количеству изделий в гардеробе. В силу неединственности оптимального решения выбор происходит по желанию заказчика или потребителя.

В рамках описанного порядка критерий оптимизации сформулирован следующим образом: *оптимальным считается такой гардероб, в котором максимальное количество изделий получено из определенного (заданного) количества комбинаторных геометрических элементов.*

Обоснование нахождения оптимального соотношения количества элементов и количества изделий с помощью частичного упорядочивания положено в основу поиска оптимальных значений в автоматизированном режиме при создании гардероба из комбинаторных геометрических элементов.

2. Программные средства для реализации метода частичного порядка в автоматизированном режиме. Описанный выше метод нахождения оптимального результата должен применяться в совокупности с автоматизированной системой, которая построена на базе комбинаторных методов проектирования деталей одежды.

Для реализации методов комбинаторики и частичного упорядочения разработано программное обеспечение, которое позволит в автоматизированном режиме проектировать гардероб из комплекта геометрических элементов.

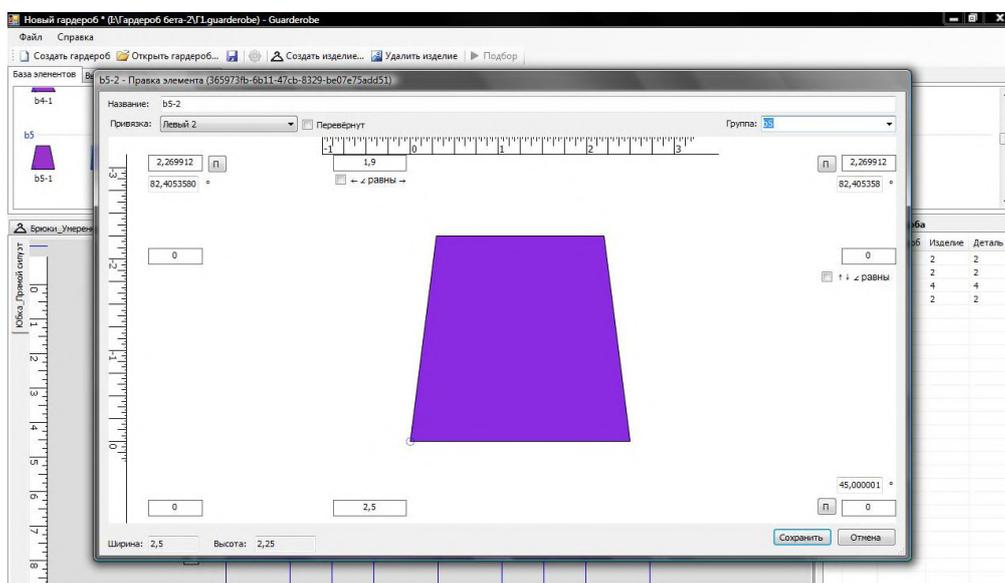


Рис. 1. Окно проектирования комбинаторного геометрического элемента

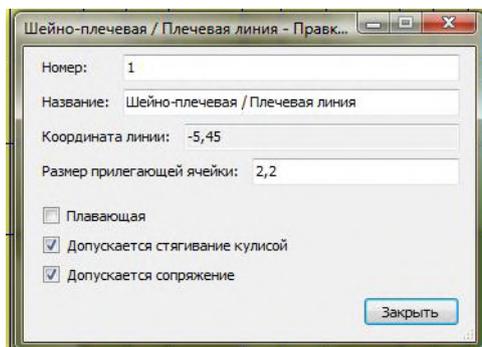


Рис. 2. Окно редактирования параметров ячейки

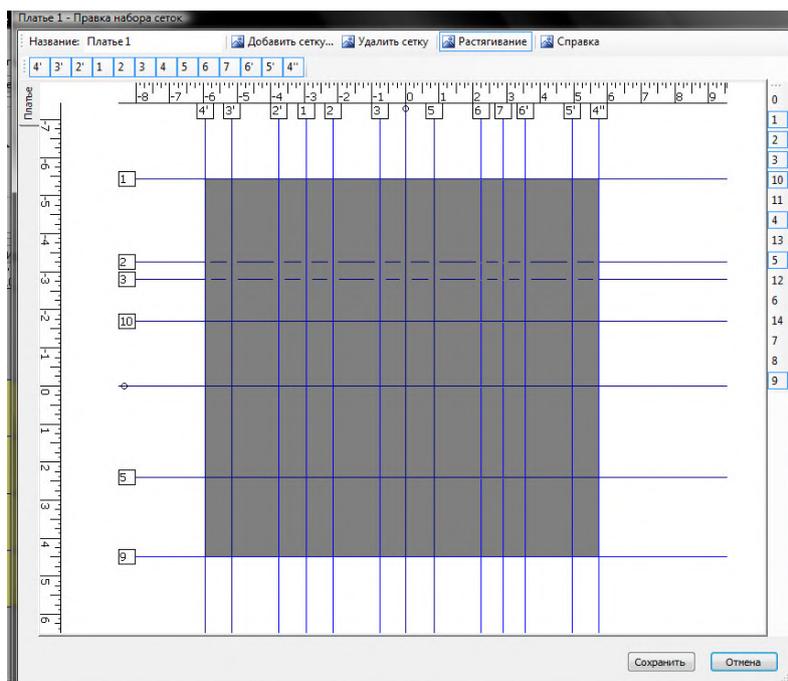


Рис. 3. Окно формирования сетки изделия

Программа предназначена для инженера-конструктора, работающего на предприятиях мелкосерийного и индивидуального швейного производства.

Функциональность программы условно подразделяется на 4 блока:

1. Создание комбинаторных элементов.
2. Создание базисных сеток конструкций для изделий.
3. Формирование комплекта комбинаторных геометрических элементов, входящих в гардероб.
4. Разработка гардероба на базе комплекта элементов.

Первый блок — доступен сразу при открытии программы (рис. 1). Это блок создания элементов. В данном блоке элементы располагаются по группам, относительно их геометрической формы. Элементы можно выбрать из имеющихся, сохраненных в базе данных, а также можно создать новый или отредактировать готовый комбинаторный элемент.

Второй блок включает формирование набора сеток изделий, необходимых для гардероба. Для создания новой сетки необходимо отметить соответствующие горизонтальные и вертикальные линии и задать нужные размеры для ячеек. Размер ячейки устанавливается как расстояние до прилегающей линии. Также в редакторе отображается координа-

та линии и ее параметры, которые можно редактировать (рис. 2, 3).

Последний блок включает подбор комбинаторных геометрических элементов для формирования изделий гардероба (рис. 4). На данном этапе есть возможность автоматического подбора подходящих элементов из базы [5]. Достаточно щелкнуть на нужную ячейку, программа предлагает элементы, которые удовлетворяют размерам и требованиям этой ячейки. Таким образом, элементы выбираются из общей базы, из предложенного списка элементов либо создаются новые элементы.

Справа в окне «элементы гардероба» отображается количество элементов проектируемого гардероба и количество элементов для конкретного изделия или детали (рис. 4).

Этап разработки гардероба предполагает добавление новых изделий в гардероб и распределение комбинаторных элементов в изделиях наиболее оптимальным способом. На данном этапе уже сформированы все сетки изделий и их детали.

В заключение отметим, что представленная программа дает возможность перевести процесс создания трансформируемой одежды в автоматизированный режим, что позволит реализовать серийное производство гардеробов из комбинаторных элементов.

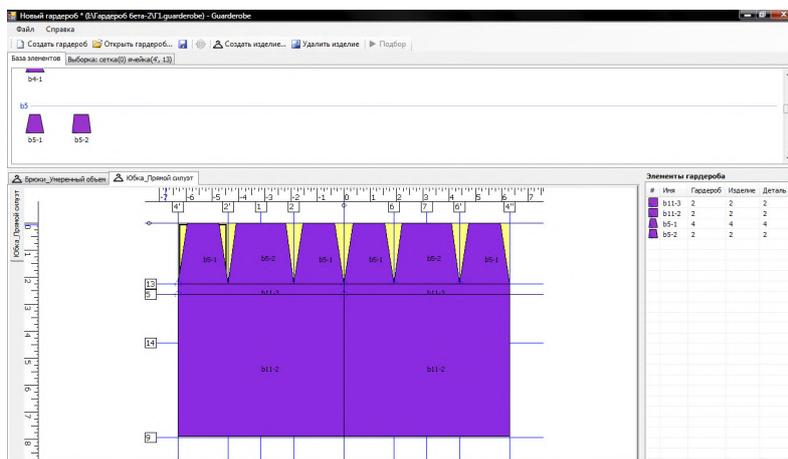


Рис. 4. Окно проектирования гардероба из геометрических элементов

Применение программы комплексно с математическими методами, позволяющими оптимизировать процесс проектирования одежды, имеет экономический и социальный эффект. Экономический эффект состоит в экономии времени на проектные процедуры. Социальный эффект достигается посредством обеспечения подросткового населения готовым многовариантным гардеробом, удовлетворяющим требованиям назначения и эксплуатации.

Библиографический список

1. Ермилова, В. В. Моделирование и художественное оформление одежды : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В. В. Ермилова, Д. Ю. Ермилова. — М. : Мастерство ; Издательский центр «Академия» ; Высшая школа, 2001. — 184 с.
2. Данилова, О. Н. Архитектоника объемных форм [Электронный ресурс] / О. Н. Данилова, И. А. Шеромова, А. А. Еремина ; под ред. С. Г. Масленниковой — Режим доступа : <http://abc.vvsu.ru/Books/architektonika/default.asp> (дата обращения: 18.06.2011).
3. Упорядоченное множество [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/Упорядоченное_множество (дата обращения: 23.06.2011).
4. Частично упорядоченное множество [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/Частично_упорядоченное_множество (дата обращения: 18.06.2011).
5. Множество [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://ru.wikipedia.org/wiki/Множество> (дата обращения: 23.06.2011).

ДЕМЧЕНКО Ольга Николаевна, магистр гр. КМ-141 художественно-технологического факультета, кафедра «Конструирование и технология легкой промышленности».

КОРОБОВА Антонина Брониславовна, кандидат технических наук, профессор (Россия), декан художественно-технологического факультета; профессор кафедры «Конструирование и технология легкой промышленности». Адрес для переписки: hotta_muse@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2014 г.
© О. Н. Демченко, А. Б. Коробова

Книжная полка

004/P98

Рябко, Б. Я. Криптографические методы защиты информации : учеб. пособие для вузов по специальностям: «Многоканальные телекоммуникационные системы», «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», «Защищенные системы связи» / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов. — 2-е изд., стер. — М. : Горячая линия-Телеком, 2014. — 229 с. — ISBN 978-5-9912-0286-2.

Изложены основные подходы и методы современной криптографии для решения задач, возникающих при обработке, хранении и передаче информации. Основное внимание уделено новым направлениям криптографии, связанным с обеспечением конфиденциальности взаимодействий пользователей компьютеров и компьютерных сетей. Рассмотрены основные шифры с открытыми ключами, методы цифровой подписи, основные криптографические протоколы, блочные и потоковые шифры, криптографические хэш-функции, а также редко встречающиеся в литературе вопросы о конструкции доказуемо невскрываемых криптосистем и криптографии на эллиптических кривых. Изложение теоретического материала ведется достаточно строго, но с использованием элементарного математического аппарата. Подробно описаны алгоритмы, лежащие в основе криптографических отечественных и международных стандартов. Приведены задачи и упражнения, необходимые при проведении практических занятий и лабораторных работ. Для студентов, обучающихся по направлению «Телекоммуникации». Будет полезна специалистам.

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ «КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ ШВЕЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ»

В статье приводится концептуальная модель реляционной базы данных «Компоненты системы швейных изделий», содержащая информацию о материалах, нитях и соответствующие комбинации соединений, применяемых в производстве изделий легкой промышленности. Разработанная схема основывается на совокупной информации по системам материалов и их апробированным характеристикам в удобном для использования виде и позволяет производить дальнейшее их пополнение в связке с другими программными средствами.

Ключевые слова: база данных, многокомпонентная система материалов, концептуальная модель данных.

В процессе моделирования технологических процессов появляется определённый набор экспериментальных данных. В связи с чем остро встаёт задача классификации и конструктивного хранения предыдущих экспериментальных наработок. Более того, сами процессы, которые представлены как объекты моделирования, зачастую претерпевают некоторые оптимизационные преобразования, после которых очень важно проверить работоспособность и правильность функционирования полученной модели в сравнении с её предшественницей. До внедрения ЭВМ в массовое пользование входные параметры эксперимента часто определялись эвристически, а позже сохранялись в виде традиций и впоследствии в виде стандартов. Из чего следует, что необходимость в накоплении и систематизации полученных значений неизбежна. Наиболее остро эта проблема возникает в случае многофакторных, многокомпонентных систем, описывающих множество входных и выходных параметров.

В данной работе задача хранения данных для моделей с большим количеством параметров рассмотрена на примере многокомпонентной системы материалов (МСМ) изделий лёгкой промышленности. Описание области, на основе которой производилось формирование схемы базы данных, представлено ниже.

Многокомпонентной следует считать систему материалов, содержащую не менее трёх, в том числе различных по виду, составу и структуре компонентов. Число компонентов зависит от вида, назначения и условий эксплуатации швейного изделия. Данный объект относится к классу сложных систем и может быть представлен в виде многопараметрической модели (рис. 1). Элементами системы являются различные материалы $x = \{x_1, \dots, x_k, \dots, x_n\}$, имеющие разнообразные количественные и качественные характеристики $p^{(k)} = \{p_1^{(k)}, \dots, p_m^{(k)}\}$, где $p_i^{(k)}$ — i -я характеристика k -го элемента системы, $k = 1, n$. Управляющая информация $b = \{b_1, b_2, \dots, b_l\}$ содержится в различных видах нормативно-технической документации. В качестве инструментов системы, используется информация о назначении

изготавливаемых изделий, условиях эксплуатации $c = \{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ и режимы работы технологического оборудования $d = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$. Выходными параметрами $y = \{y_1, y_2, \dots, y_q\}$ являются МСМ.

Изучение свойств МСМ обусловлено их приоритетным положением в системе моделирования. Кроме того, информация о свойствах материалов и систем, созданных при их сочетании, лежит в основе проведения работ на всех этапах проектирования. Следует отметить, что на практике такой информации зачастую оказывается недостаточно для принятия оптимальных решений. Поэтому возникает объективная необходимость в систематическом проведении исследований с целью создания базы данных научно-обоснованных показателей качества МСМ [1, 2].

Совершенствование процесса проектирования изделий лёгкой промышленности ставит перед проектировщиками соответствующую проблему накопления и систематизации той информации, которая необходима для создания определённых систем пакетов, а также тех сведений, которые уже были получены в ряде предыдущих экспериментов.

В настоящей работе предложен вариант модели базы данных, который может быть использован для решения подобной задачи.

Основными объектами рассматриваемой предметной области являются различные материалы: основные, прокладочные, подкладочные, скрепляющие. Ассортимент образцов, применяемых для производства изделий в лёгкой промышленности, характеризуется большим разнообразием по способу производства, структуре, виду отделки и т.д. Каждый компонент системы характеризуется совокупностью геометрических, физических, механических и других свойств, характеризующих его внешний вид и структуру.

База данных организуется в соответствии с определённой концептуальной моделью, которая описывает характеристики некоторых сведений и взаимоотношения между соответствующими им реалиями и которая предназначена для информационного обеспечения одного или более

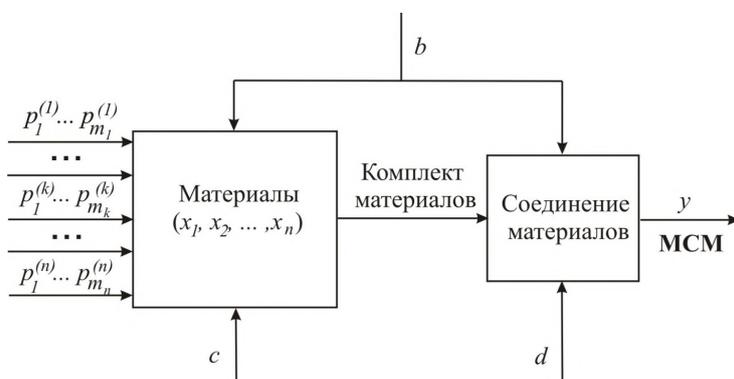


Рис. 1. Модель объекта исследования

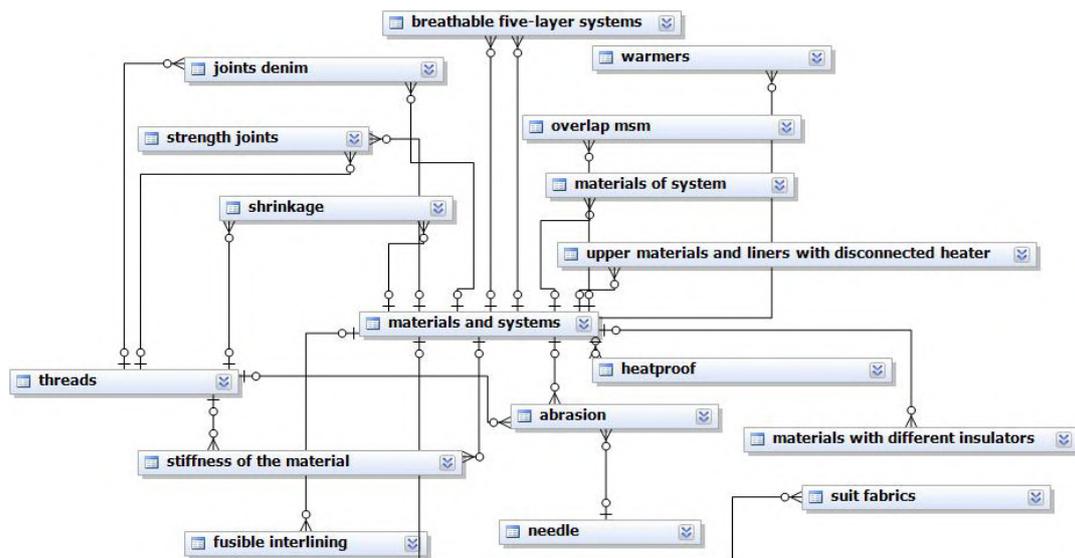


Рис. 2. Диаграмма базы данных

приложений [3]. Концептуальная модель данных в этом определении понимается как представление характеристик предметной области в терминах, относящихся к ним реалий и отношений между реалиями.

Основная задача разрабатываемой базы данных состоит в представлении информации по системам материалов и их апробированным характеристикам в совокупном, удобном для использования виде и дальнейшее их пополнение в связке с другими программными средствами.

В качестве СУБД при разработке использовалась MySQL v.5.6. Полученная база данных может быть интегрирована с программой или программным комплексом.

Информация, представленная в реализованной схеме, основывается на следующих исследованиях систем материалов:

- суммарное тепловое сопротивление;
- воздухопроницаемость;
- жёсткость соединительных швов;
- стойкость к истиранию;
- режимы дублирования.

На основе анализа предметной области разработана структура базы данных, которая содержит семнадцать взаимосвязанных между собой таблиц. Каждая из них содержит поле с уникальным идентификатором для экземпляра записи, который используется в качестве первичного ключа.

Основными являются сущности «materials and systems», «needle» и «threads». Диаграмма, характеризующая связи между элементами базы данных представлена ниже (рис. 2). Таблица «materials and systems» является ключевой для всех остальных. Она содержит информацию по материалам или системам материалов, над которыми будут проводиться исследования и включает в себя следующие поля:

- id — идентификатор и первичный ключ;
- name — название образца ткани или системы материалов;
- symbol — аббревиатура, используемая для сокращённого названия материала, а чаще для систем материалов;
- system — рассматривается, как булево значение. Этот атрибут определяет, является ли запись многокомпонентной системой материалов или это просто материал;
- comments — предназначен для занесения дополнительной информации о материале.

Сущность «overlap msm» хранит информацию о влиянии режимов дублирования на параметры многокомпонентных систем материалов и включает девять параметров:

- id — идентификатор записи;
- id_msm — ссылка на таблицу «materials and systems»;
- pressing_time — время прессования;
- stiffness — жёсткость;

— pressing_temperature — температура прессования;
 — average_delamination — средняя нагрузка расслаивания;
 — adhesion_strength — прочность склеивания;
 — average_recovery_angle — среднее значение угла восстановления;
 — wrinklefree — несминаемость.

Разработанная модель позволяет хранить информацию о материалах, нитях и соответствующие комбинации соединений, применяемых в производстве изделий легкой промышленности.

В заключение необходимо отметить, что современные швейные предприятия далеко не всегда располагают данными, наработками экспериментов, оценивающими те или иные свойства производимого изделия. Зачастую даже у крупных производителей нет возможности описать все этапы, используемые в создании готовой продукции. Таким образом, спроектированная база данных будет полезна в качестве инструмента накопления и дальнейшего анализа при описании операций, связанных с изучением многокомпонентных систем для изделий легкой промышленности.

УДК 004.421-24-443.5

Библиографический список

1. Чижик, М. А. Структурный подход к моделированию многокомпонентных систем материалов для изделий легкой промышленности / М. А. Чижик, М. Н. Рассказова, В. И. Стариков // Известия вузов. Сер. Технология текстильной промышленности. — 2014. — № 6 (354). — С. 121–124.
2. Чижик, М. А. Метод определения суммарного теплового сопротивления материалов и пакетов одежды / М. А. Чижик, Т. М. Иванцова, Е. Ю. Долгова, Т. Ю. Каргаполова // Известия вузов. Сер. Технология легкой промышленности. — 2013. — № 1 (19). — С. 20–22.
3. Мюллер, Роберт Дж. Базы данных и UML. Проектирование / Мюллер Роберт Дж. — М.: ЛОРИ, 2002. — 420 с.

ДОРКИН Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Конструирование и технологии изделий легкой промышленности».

Адрес для переписки: supermega007dima@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.12.2014 г.

© Д. В. Доркин

М. А. ИВАЩЕНКО
А. Б. КОРОБОВА

Омский государственный
 институт сервиса

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКЕЛЕТНОЙ АНИМАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОЯСНЫХ ИЗДЕЛИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РЕЖИМЕ

В статье рассмотрены перспективы использования трехмерного проектирования, общие концепции и принципы работы программного продукта для проведения виртуальной примерки поясных изделий в автоматизированном режиме.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, виртуальная примерка, скелетная анимация, цветовое кодирование.

Введение. Развитие швейной промышленности неотделимо от высоких технологий. В последнее время значительно вырос интерес производителей к проектированию одежды с использованием систем автоматизированного проектирования (в дальнейшем САПР) швейных изделий. САПР используют, начиная от выполнения раскладок лекал к градации деталей и далее непосредственно к построению конструкций.

С развитием трехмерных компьютерных технологий в состав САПР швейных изделий также стали включаться 3D-модули различного характера и назначения. Некоторые системы реализуют процесс трехмерного проектирования конструкции изделия с последующей разверткой («i-Designer», «СТА-ПРИМ»). Каждая из САПР имеет свои привлекательные стороны и может оказаться наиболее пригодной для конкретных условий работы того или

иного швейного предприятия. Выбор САПР должен осуществляться с учетом масштабов производства, ассортимента изготавливаемых изделий и множества других факторов. Наиболее же универсальной и приемлемой из систем двухмерного проектирования является САПР «Грация». Во-первых, это отечественная система, а значит, она имеет доступную стоимость, понятный русскоязычный интерфейс, немаловажно наличие сопровождения программного продукта фирмой-разработчиком. Но, несмотря на все достоинства, «Грация» все же является двухмерной системой проектирования, а конструирование одежды нельзя рассматривать только как плоскостное, т. к. одежда представляет собой пространственный объект, взаимосвязанный с другим пространственным объектом — фигурой человека. Поэтому на основе плоскостного конструирования необходимо вести дальнейшее совершенствование

процесса проектирования одежды с использованием информации о закономерностях пространственных линий и параметров конструкции, необходимо развивать направление совмещения систем 2d и 3d. Это позволит значительно облегчить труд конструктора, ускорит процесс проектирования, повысит наглядность и эффективность работы.

Перспективы использования бесконтактных методов проектирования поясной одежды. Сканером называют устройство, позволяющее вводить в компьютер изображения объектов в виде текста, фотографии на плоские носители изображений, а также изображения объемных объектов.

В последнее время в области бесконтактных измерений поверхности тела человека наблюдаются значительные изменения: появляется большое количество новых современных методов, которые заслуживают особого внимания. Существует множество систем, с помощью которых определяются параметры качественно и количественно характеризующие сложную поверхность, использующих цифровое представление этих параметров.

Возможность получения измерений фигуры может быть реализована с помощью современных технических средств: сканеров и видеосканеров, цифровых фото- и видеокамер.

Во всех сканерах есть источник света, механизм перемещения датчика (или оптической системы), а также электронное устройство, преобразующее считываемую информацию в цифровую форму. До сих пор во всех цифровых фотоаппаратах (как и в видеокамерах) используется ПЗС (прибор с зарядовой связью). В перспективе ожидается новая технология: наряду с традиционными ПЗС будут использоваться новые интегральные схемы.

Видеосканер, как один из видов сканирующих приборов, — это комплекс аппаратных средств, предназначенный для захвата видеоизображений. Основным элементом такого сканера является карта для ввода и кодирования видеоинформации.

Видеосканеры (DV видеокамеры, видеопринтеры, видеобластеры) являются альтернативой сканерам других типов, особенно когда необходимо получить изображение трехмерного объекта.

Наряду с перечисленными выше сканерами, существуют еще и 3D сканеры, позволяющие получать наиболее полную информацию о поверхности тела или манекена. Например, антропометрический теневой сканер (LASS). Эта система использует несколько видеокамер для наблюдения за соприкосновением профильной линии поверхности тела. Существует ряд других устройств сканирования. Трехмерный дигитайзер Micro Scribe 3D Immersion. Является успешной разработкой с точки зрения точного измерения и воспроизведения сложных поверхностей. Электронное оборудование отличается точностью быстродействием и возможностью воспроизводить не только форму, но и цвета поверхностей.

Model Maker скоростной и функциональный гибкий ручной 3D сканер лондонской компании 3D Scanners, LTD является первой в мире системой, способной воспроизводить сложные объемные модели в цвете. В сканере Model Maker применен принцип, известный как лазерная триангуляция.

Помимо 3D сканеров возможно использование цифровых камер и видеокамер, которые могут быть: бытовые, полевые, студийные, комбинированные.

Во многих камерах для регистрации динамики снимаемой сцены предусмотрен режим покадровой

съемки с частотой фиксации кадров, позволяющей потом создать эффект псевдодвижения.

Цифровые видеокамеры (стандарта PV) — это более дешевый и менее перспективный способ ввода видеоинформации в компьютер. Цифровой фотоаппарат дает изображение, сравнимое по качеству с фотографией, снятой отличным фотоаппаратом.

По сравнению со сканером, устройство оцифровки видеосигнала предоставляет большие возможности для ввода изображений. С помощью комбинаций видеокамеры и устройства оцифровки можно вводить трехмерные объекты, эти устройства оцифровки видеосигнала осуществляют преобразование изображений в цифровую форму [1–3].

Однако любая сложная система имеет свои недостатки. Трехмерные боди-сканеры — не исключение.

Бесспорно, системы боди-сканирования стоят на шаг впереди сканеров и видеосканеров, цифровых фото и видеокамер, так как при помощи сканирования можно получить более точное компьютерное изображение человеческого тела, поэтому этот метод трехмерного снятия размерных признаков подходит для построения лекал одежды на людей с любым отклонением от стандартной фигуры. Однако в силу высокой стоимости системы боди-сканирования у нас в стране в ближайшие несколько лет не имеют перспектив к развитию и совершенствованию.

Таким образом, цели совершенствования и повышения эффективности автоматизированного измерения поверхности фигуры человека могут быть сведены к повышению точности, сокращению времени измерения, уменьшению времени анализа обработки данных, повышению информативности и надежности.

Погрешности измерений с использованием фотоснимков. Бесконтактное исследование форм и размеров фигуры человека, основанные на современных цифровых технологиях, все чаще внедряются на производство легкой промышленности. После резкого удешевления цифровой техники наиболее перспективным направлением стало развитие и внедрение в производство систем бесконтактного измерения фигуры человека с помощью цифровых фотографий.

При проведении измерений с использованием фотоснимков возникают погрешности измерения, обусловленные следующими факторами:

1) геометрические искажения объекта измерения, вызванные геометрическими искажениями при фотосъемке;

2) точность выбора начальной и конечной точки на фотографии не может быть выше размеров одного пикселя монитора, на котором производится выбор;

3) при измерении длин кривых лежащих под углом к плоскости фотографирования их размер на фотоснимке будет меньше реального.

Точность получения размерных признаков по цифровой фотографии затрудняется за счет влияния большого количества факторов, в частности погрешности измерения с использованием фотоснимков. Учет вышеизложенных погрешностей позволяет получить измерения с приемлемой для задач проектирования точностью, тем самым уменьшая вероятность возникновения конструктивных дефектов.

Для полного анализа особенностей нижних конечностей недостаточно только размерной

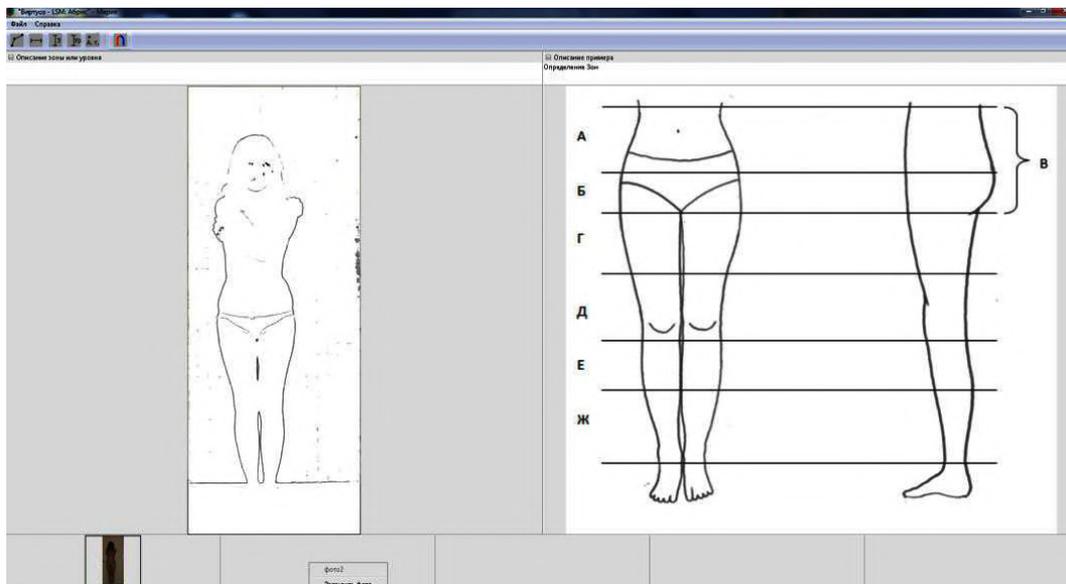


Рис. 1. Абрис фигуры человека по фотографии в программе «Виртуоз — LSM: Абрис» (образец)

характеристики фигуры, также необходимо визуальное исследование.

Снимки фигур позволяют определить проекционные размерные признаки, которые дают подробную информацию о форме тела человека, а их использование в методике проектирования увеличит точность построения конструкций.

Программный продукт, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619191 «Виртуоз — LSM: Абрис» [4], позволяющий получить абрис фигуры (рис. 1).

Построение виртуального манекена с учетом индивидуальных особенностей фигуры. Процесс проектирования одежды все чаще дополняют средствами работы не только с плоскими, но и с пространственными объектами, что позволяет решать задачи трехмерного проектирования и моделирования одежды на фигуры человека.

Поверхность тела человека представляет собой сложную незакономерную поверхность, которая нестабильна и зависит от многих изменчивых факторов. Геометрическая модель объекта должна быть его аналогом и повторять те его свойства и их взаимодействия, которые необходимы для изучения объекта, а именно для получения размерных характеристик тела человека и построения поверхности, которая станет базовой моделью [5].

В основу создания базового манекена для поясных изделий была положена скелетная анимация. *Скелетная анимация* — это способ анимирования трёхмерных моделей в мультипликации и компьютерных играх. Она заключается в том, что мультипликатор создаёт скелет, представляющий собой как правило древообразную структуру костей, в которой каждая последующая кость «привязана» к предыдущей, то есть повторяет за ней движения и повороты с учётом иерархии в скелете. Иерархией в скелете называется система объектов, в которой одни объекты своим расположением в пространстве влияют на расположение других объектов [6–8]. Таким образом, 3D-скелет описывает иерархию трансформаций объекта; сами объекты называют костями. Скелет можно определить как совокупность костей. В работе авторы исполь-

зуют скелетную трансформацию для построения манекена фигуры человека с индивидуальными особенностями, в частности девушки-подростка [9, с. 78–79].

В основе манекена лежит «скелет», названный так из-за схожести со скелетом человека, но в отличие от скелета человека «скелет» 3D модели не является физической основой «тела» и поэтому может не совпадать по расположению и составу со скелетом человека. После трансформации скелета виртуального манекена необходимо провести расчет его поверхности. Поверхность манекена задается полигональной моделью с заданием ориентации ее полигона для задания внутренней и внешней сторон поверхности, а для уточнения формы поверхности нижних конечностей манекена используется метод сжатия/расширения конечностей относительно «кости». Используя разработанную авторами программу «Виртуоз — LSM: Абрис» по заданным точкам производится измерение диаметров (ширин) конечностей моделируемого человека и корректировка конечностей базового манекена в программе «Виртуоз — LSM: Проектирование» [10]. По каждой из «костей» производится корректировка по 3–4 точкам.

Проведение виртуальной примерки поясного изделия на 3D-манекене. На сегодняшний день многие предприятия используют программное обеспечение для построения поясных и плечевых изделий, однако изготовление до сих пор остается достаточно трудоемким процессом. Требуется производить несколько примерок изделия на фигуре человека, поскольку существующие на сегодняшний день манекены рассчитаны на типовые фигуры и не могут учесть всех особенностей фигуры.

В результате вычисления равновесного расположения конструкции на манекене получается дополнительная информация о расположении и степени растянутости (сжатии) ребер конструкции. Информация о растяжении (сжатии) ребер конструкции и их расположении относительно друг друга позволяет оценить дефекты посадки конструкции.

После «примерки» конструкции виртуального изделия модель представляется в виде составляющих

двухмерных деталей с аналогичным цветовым кодированием растянутых (сжатых) ребер. При примерке 3D-изделия координаты каждого узла сетки детали одновременно хранятся в двухмерном пространстве исходной детали и в трехмерном пространстве, связанном с манекеном.

При этом в двухмерном пространстве узлы сетки не перемещаются в процессе примерки, что позволяет восстановить исходный вид плоской детали, а положение узлов в трехмерном пространстве позволяет визуализировать особенности ее посадки на манекен с использованием цветового кодирования.

Заключение. Проблема автоматизированного проектирования поясной одежды с учетом индивидуальных особенностей фигуры заключается в необходимости проведения большого количества примерок на фигуре человека для выявления причин возникновения дефектов посадки в поясной одежде и возможности их устранения.

Автоматизированные измерения поверхности фигуры человека позволяют сократить время измерения, уменьшить время анализа обработки данных, повысить точность, информативность и надежность.

Разработка методики цветовой визуализации и алгоритмов построения, сборки и примерки конструкций поясных изделий, которые позволяют обеспечить на стадии проектирования эффективность по устранению дефектов посадки поясного изделия, является основной задачей в рамках проблемы, на решение которой направлена работа.

Современные средства компьютерной графики позволяют решить множество задач моделирования изделий. Разработанный комплекс программ является одним из возможных вариантов, который имеет большие перспективы развития.

Использование систем виртуальной примерки на 3D-манекене откроет новые возможности для проектирования и моделирования одежды. Использование цветового кодирования позволит конструктору избавиться от дополнительных примерок изделия на фигуре человека и проверить правильность своих решений с помощью программного комплекса.

В настоящее время для любого производителя одежды компьютерное проектирование выгоднее ручного. Поэтому использование предложенного программного продукта снизит затраты времени на измерение фигуры, облегчит труд конструктора, ускорит процесс проектирования, примерки и разработки модельного ряда, повысит наглядность и эффективность работы.

Дальнейшая модернизация программного комплекса позволит получать визуальное представление дефектов поясных изделий не только в статике, но и в динамике.

Библиографический список

1. Кузнецова, Н. Д. Совершенствование системы конструирования одежды с использованием современных технических средств / Н. Д. Кузнецова. — М. : Наука, 1989. — 46 с.
2. Мичикова, Н. В. Методы бесконтактного измерения фигуры человека / Н. В. Мичикова, И. В. Лашина, В. Ю. Юрин // Региональные аспекты развития легкой промышленности в России: перспективы и конкурентоспособность : сб. ст. науч.-практ. конф. ; под общ. ред. Н. У. Казачуна. — Омск : ОГИС, 2006. — С. 117–121.
3. Мичикова, Н. В. Перспективы получения исходной информации для конструирования одежды с использованием цифровых технологий / Н. В. Мичикова, И. В. Лашина // Современные тенденции развития образования в высшей школе : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. ; под общ. ред. Н. У. Казачуна. — Омск : ОГИС, 2005. — С. 73–77.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619191 «Виртуоз – LSM: Абрис», 11 октября 2012 г.
5. Балжирсурэн, Г. Автоматизация проектирования нестандартных компьютерных манекенов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Г. Балжирсурэн. — Омск : СибАДИ, 2009. — 178 с.
6. Скелетная анимация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://unmail22.narod.ru/Books/3D_XNA4/9.7.html (дата обращения: 09.01.2012).
7. Скелетная анимация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://wat.gamedev.ru/articles/SkelAnim1?page=2> (дата обращения: 09.01.2012).
8. Цветовое кодирование [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vocabulary.ru/dictionary/896/word/cvetovoe-kodirovanie> (дата обращения: 29.04.2012).
9. Иващенко, М. А. Автоматизация процесса виртуальной примерки на трехмерную модель фигуры человека на этапе проектирования / М. А. Иващенко, А. Б. Коробова, А. Г. Бурцев. — Омск : ОГИС, 2013. — 144 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619192 «Виртуоз – LSM: Проектирование», 11 октября 2012 г.

ИВАЩЕНКО Мария Алексеевна, магистр гр. Км 141 художественно-технологического факультета, кафедра «Конструирование и технологии легкой промышленности».

КОРОБОВА Антонина Брониславовна, кандидат технических наук, профессор (Россия), декан художественно-технологического факультета; профессор кафедры «Конструирование и технологии легкой промышленности».

Адрес для переписки: Mazyanya@gmail.com

Статья поступила в редакцию 28.11.2015 г.

© М. А. Иващенко, А. Б. Коробова