

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

Критериальная система проектирования и использования технологических процессов для повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя	
С.В. Сафонов	4
Моделирование деформационного упрочнения при накатывании сферической заготовки методом конечных элементов	
Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач	11
Повышение эксплуатационных свойств изделий путем нанесения и удаления покрытий	
С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев	15

Информатика, вычислительная техника и управление

Мультипарадигмальность управления жизненным циклом дефектов программных и аппаратных систем	
А.О. Данилин, М.Д. Кол, Г.В. Петрухнова	24
Обобщенная оптимизационная модель развития мультисервисных сетей	
Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев	28
Активная нейросетевая модель управления критическими объектами	
Е.М. Васильев, Р.А. Говоров	31
Технология построения координатора распределенных транзакций в условиях WEB-сервиса	
С.А. Рыков, Ахмед Али М. Ахмед, М.В. Локшин	37
О субтангенциальном подходе к анализу динамической модели конкурентного равновесия	
Ю.Я. Агранович, В.Л. Хацкевич, А.С. Чернова	41
Разработка программного обеспечения для классификации сигналов с использованием продукционной базы знаний	
В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.Н. Донских	45
Управляемость дифференциальной системы параболического типа с распределенными параметрами на графе	
С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов	49
Анализ и выбор структуры объектно-реляционной СУБД медицинской информационной системы	
В.А. Васильченко, В.Л. Бурковский	57
Анализ устойчивости систем многоальтернативного управления на основе декомпозиции	
С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев	60
Разработка конфигурации учета корреспонденции на базе системы 1С: Предприятие 8	
А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Э.Е. Прудников	63
Разработка комбинированных нейросетевых моделей анализа трафика в телекоммуникационных сетях	
Н.В. Белецкая, Ю.Т. Свиридов	66
Исследование стохастических сетей с узлами конечной емкости и запросами из разных классов	
Хоанг Жанг, О.Я. Кравец	70
Исследование очереди М/М/1 для определения влияния эластичного потока данных при межмодульном взаимодействии	
Нгуен Тхой Ань, О.Я. Кравец	76

Формирование базы знаний системы управления объектами с прогнозируемыми рисками	
С.М. Пасмурнов, О.А. Фиртыч	82
Математические модели коррекции бескарданной инерциальной навигационной системы беспилотника на основе неполной информации о траектории его движения	
А.А. Кудряш	86
Моделирование движения пробного тела криогенного гравиметра	
А.А. Кудряш, Г.Е. Шунин, В.Н. Ястребков	91
Исследование датчиков первичной информации о воздушном потоке методом имитационного моделирования	
С.П. Полуэктов, В.С. Струков, С.О. Цолетан	94

Радиотехника и связь

Эффективное многопороговое декодирование недвоичных кодов с предварительной оценкой ошибочности проверок	
А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, А.В. Муратов	99
Исследование поведения радиопомех в системах передачи дискретной информации	
И.В. Остроумов, М.А. Ромащенко	102
Исследование преобразователя частоты, выполненного в субмикронном технологическом базисе	
Д.В. Журавлёв, А.И. Мушта	105
Метод измерения многосигнальной избирательности приемника прямого преобразования	
Н.А. Самоцвет	112
Рассеяние электромагнитных волн на диске, расположенном в двумерно-неоднородном поглощающем плазменном образовании	
А.Н. Косенков, А.П. Ярыгин	118
Помехоустойчивость фазоманипулированных сигналов на основе вейвлета Гаусса	
С.В. Дворников, С.С. Манаенко	123
Повышение надёжности передачи данных в беспроводных сетях с использованием децентрализованного режима функционирования	
Д.В. Асотов, В.И. Маслов, Л.Ш. Голоскокова	126

Энергетика

Оценка перетоков мощности в тяговой сети постоянного тока по данным автоматизированной системы АСМУЭ ФКС	
А.Л. Каштанов, О.О. Комякова	130
Построение и анализ аналитического решения уравнений, описывающих рабочий процесс инерционного трансформатора	
С.Л. Блюмин, А.В. Галкин, А.М. Казьмина	134
Моделирование процессов тепломассопереноса в микроканалах компактного теплообменника на основе нитевидных монокристаллов кремния	
Д.А. Коновалов, Н.Н. Кожухов, И.Г. Дроздов, Е.Г. Новиков	139

**КРИТЕРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

С.В. Сафонов

Разработан и обоснован новый принцип полезности, позволяющий эффективно изменять эксплуатационные поверхностного слоя изделий, работающих в условиях высоких силовых нагрузок, температур или знакопеременных внешних воздействий. Предложенная в работе критериальная оценка технологических воздействий позволила научно обосновать применимость известных и целесообразность создания новых видов формирования поверхностного слоя с учетом временных и финансовых ограничений. Рассмотрены возможности и технологии создания комплексных процессов, расширяющих технологические возможности исполнителей при создании изделий новых поколений техники

Ключевые слова: критерии полезности, система, технологии, ограничения, методы оценки результативности, воздействия

Для критериальной оценки уровня полезности введены следующие обозначения:

$P_{p1}, P_{p2}, \dots, P_{pn}$ – показатель заданных разработчиком эксплуатационных характеристик перспективного изделия, зависящие от состояния их поверхностного слоя;

n – количество значимых показателей, обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики изделия;

$P_{o1}, P_{o2}, \dots, P_{on}$ – достигнутые показатели на современном уровне развития технологии;

$P_{\partial 1}, P_{\partial 2}, \dots, P_{\partial n}$ – показатели достижимых перспективных технологических методов и средств повышения эксплуатационных характеристик за счет совершенствования поверхностного слоя;

$K_{o1}; K_{o2}; \dots, K_{on}; K_{\partial 1}; K_{\partial 2}; \dots, K_{\partial n}$ – векторные коэффициенты полезности технологического воздействия на достигнутый и достижимый эксплуатационный показатель, определяемый свойствами поверхностного слоя;

m – количество технологических воздействий требуемых для совершенствования эксплуатационных характеристик изделий за счет изменения их поверхностных свойств;

$\bar{K}_1, \bar{K}_2, \dots, \bar{K}_m$ – положительный коэффициент полезности, получаемый от применения технологических средств совершенствования поверхностного слоя при воздействии на достигнутый уровень эксплуатационного показателя изделия;

$\bar{K}'_1, \bar{K}'_2, \dots, \bar{K}'_m$ – коэффициент оценивающий возможность снижения эксплуатационных показателей от применения технологического воздействия на поверхностный слой изделия критериями использования технологических воздействий на поверхностный слой изделия являются

$$\bar{K}_1, \bar{K}_2, \dots, \bar{K}_m \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\bar{K}'_1, \bar{K}'_2, \dots, \bar{K}'_m \rightarrow \min, \quad (2)$$

Общий критерий полезности имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{K}_{o1}(\bar{K}'_{o1})P_{o1} &\geq P_{p1}, \\ \bar{K}_{o2}(\bar{K}'_{o2})P_{o2} &\geq P_{p2}, \\ &\dots\dots\dots \\ \bar{K}_{om}(\bar{K}'_{om})P_{on} &\geq P_{pn}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для разработки концепции выбора или основания необходимости проектирования нового технологического процесса требуется применение и создание новых методов и средств, учитывающих эксплуатационные показатели, достигаемые за счет модификации и изменения характеристик поверхностного слоя и (в ряде случаев) одновременного изменения его толщины.

Управление процессом назначения и выбора методов модификации или изменения геометрии слоя может выполняться с использованием теории подобия [1] и нестрогого предпочтения [2]. Для критериальной оценки предпочтительного выбора средств внешнего воздействия следует использовать накопленный потенциал средств информации при экспертной оценке выбора

исполнителем (нередко в режиме диалога) и теории множеств.

Если $\Pi_{oi} = \bar{K}_{oi}$, $\Pi_{oi} \geq \Pi_{pi}$, то для «i» технологического воздействия принимается $\Pi_{pi} = \Pi_{oi}$ и согласовывается с разработчиком возможность снижения заданных эксплуатационных показателей до уровня Π_{oi} . Здесь может быть несколько вариантов:

- согласиться с использованием технологических воздействий достигнутого уровня;
- предоставить технологам время на разработку новых методов и средств для совершенствования поверхностного слоя и достижения первоначально заданного уровня эксплуатационных показателей изделий;
- использовать комбинированные технологии, учитывающие при одновременном воздействии на показатели слоя нескольких способов

$$K_{m1}(\Pi_{o1}) + K_{m1}(\Pi_{o2}) + \dots + K_{m1}(\Pi_{om}) \rightarrow K_{max}(\Pi_{oi}), \quad (4)$$

где $m = n^+ - n^-$, $m = \overline{1 - m}$, $I = 1 - m$
 n^+ , n^- - положительные и негативные показатели при внешних воздействиях.

Изучаемую выборку действия внешних воздействий на состояние поверхностного слоя можно ранжировать по одному (главному) или нескольким эксплуатационным показателям. Тогда формируется непрерывная (или кусочно гладкая), которая для положительных воздействиях становится выпуклой и имеет вид:

$$\Pi_{oi}(\bar{K}_{oi}) = \exp(-\sum_1^n \bar{K}_{oi}^2), \quad (5)$$

Показатели, снижающие воздействия описываются вогнутой функцией вида

$$\varphi(\Pi_{oi}) = -\sum_1^n \bar{K}_i^2, \quad (6)$$

где φ - оператор, который представляет совокупность монотонно изменяющихся функций, где критерием является

$$\varphi(\Pi_{oi}, \bar{K}_i, \tau_i) > \varphi(\Pi_{oi}, \bar{K}_i, \tau_i), \quad (7)$$

где τ_i - время действия на объект для достижения требуемого (или ожидаемого) эксплуатационного уровня.

Сочетание различных видов воздействий (K_0) должно дать

$$K_{max o} > \bar{K}_{oi}(\Pi_{oi}) \geq \frac{\Pi_{pi}}{\Pi_{oi}}, \quad (8)$$

Если применять комбинированные воздействия, то $K_{max o} \rightarrow K_{\Sigma max o}$.

Период времени (τ_0) от выбора вида технологического процесса до его реализации в изделии может быть весьма длительным, но он не должен превышать установленного срока запуска (τ_y) нового объекта в производство

$$\tau_0 = \tau_{nn} + \tau_l + \tau_k + \tau_u + \tau_d \leq \tau_y, \quad (9)$$

где τ_{nn} - время подготовки производства для использования технологии совершенствования поверхностного слоя для повышения эксплуатационных показателей изделия;

τ_l - время изготовления первой детали с новым поверхностным слоем;

τ_k - трудоемкость контроля первой детали;

τ_u - трудоемкость испытаний изделия (или детали) изготовленной по новой технологии;

τ_d - период доработки (если требуется) используемого технологического процесса.

Для решения задачи о суммарном действии внешних воздействий и достижения экстремального значения уровня полезности необходимо:

- наличие шкалы значений \bar{K}_i , после чего производится оптимизация показателей методом линейного программирования;

- если используется ограниченная выборка (что, как правило, происходит на практике), то применяется метод дискретной оценки воздействий, в том числе при комбинированном использовании таких воздействий. Здесь могут быть созданы обобщенные показатели Π_{oi} , соизмеримые с Π_{pi} и Π_{oi} , т.к. усредненные значения шкалы полезности более строго нивелируются среди этих показателей;

- упрощенной оценкой уровня полезности одного из заданных разработчиком главного эксплуатационного показателя (Π_{pi}) без учета положительных воздействий других технологических методов. Этот метод оказался наиболее востребованным, хотя и дает весьма приближенные результаты.

Технология реализации критериев воздействия технологических методов воздействия базируется на булевых переменных, которые открывают возможность оптимизировать различные воздействия с получением единственного критериального показателя полезности Π_{Σ} .

Алгоритм построения системы критериальной оценки уровня полезности приведен на рисунке.

Здесь, как правило,

$$\bar{K}_{oi}(\Pi_{oi}) \leq \bar{K}_{pi}(\Pi_{pi}) \leq \bar{K}_{oi}(\Pi_{oi}), \quad (10)$$

Алгоритм на рисунке дает возможность систематизировать отдельные воздействия с возможностью удаления негативных изменений в структуре комбинированных процессов, установить экспериментальные значения по достижению эксплуатационных показателей, обосновать допустимые временные границы освоения новых технологий с учетом их использования для перспективных изделий нового поколения наукоёмкой техники, определить возможные затраты и эффективность применения известных и разрабатываемых способов формирования поверхностных слоев с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Обоснованность выбранного по рисунку метода технологического воздействия на состояние поверхностного слоя зависит от информационной базы (базы знаний), которая должна постоянно пополняться по мере освоения новых изделий. Оценку достаточности имеющийся информационной базы можно выполнить по общему критерию "P" [2]

$$P = \sum_1^m \bar{K}_{oi} P_{oi} - \frac{1}{\psi} \int_0^{\tau} \left(\sum_0^n (\bar{K}_{pi} P_{pi} - \bar{K}_{oi} P_{oi}) \right) d\tau, \quad (11)$$

где ψ - доля «i» воздействия относительно заданного разработчиком.

$$\text{Если } \frac{1}{\psi} \int_0^{\tau} \left(\sum_0^n (\bar{K}_{pi} P_{pi} - \bar{K}_{oi} P_{oi}) \right) \rightarrow 0, \text{ то}$$

$$P \rightarrow \max, \quad (12)$$

Тогда функция «P» становится функцией насыщения и может быть решена по зависимости

$$P = \sum_1^m \bar{K}_{oi} P_{oi} - \sum_1^n (\bar{K}_{pi} P_{pi} - \bar{K}_{oi} P_{oi}) \cdot \tau (1 - e^{-\mu\tau}) \rightarrow \max \quad (13)$$

где μ - показатель интенсивности роста "P".

Решение уравнения (13) выполняется методом подобий [1]. Здесь аппроксимация может быть выполнена по аналогии с управлением электрическим полем [2]. Условие $\bar{K}_{ai} \dot{I}_{ai} \rightarrow \max$, отвечает зависимости, свойственной аperiодичному регулятору, который позволяет минимизировать время стабилизации параметра (в нашем случае время реализации известных (P_{oi}) или разрабатываемых (P_{pi}) показателей воздействий

$$\tau = K_y (\bar{K}_{oi} - \bar{K}_{pi}) d\tau, \quad (14)$$

где K_y - коэффициент, учитывающий взаимное влияние технологических воздействий.

Решение (14) имеет вид:

$$K_{pi} = K_y K_{oi} (1 - e^{\frac{\tau_a - \tau_i}{\tau_o}}), \quad (15)$$

где τ_o - период времени, необходимый для разработки и освоения перспективного способа воздействия;

τ_o - период доработки и освоения имеющегося способа воздействия;

τ_p - время освоения способа воздействия.

Эффективность выбора требуемого способа изменения в нужном направлении воздействия на поверхностный слой материала зависит от минимизации требуемого объема информации, обеспечивающей условие

$$\bar{P}_{oi} \geq P_{pi},$$

где \bar{I}_{oi} - может быть единичным или обобщенным показателем.

Граничным показателем оценки полезности является себестоимость разработки или адаптации к конкретному изделию достижимого показателя (P_{oi}), которая оценивается через стоимость (C) выпускаемого объекта производства. Для этого должен выполняться критерий

$$C \rightarrow \min \text{ при } P_{oi} \rightarrow \max. \quad (16) \quad (16)$$

Показатель "C" изменяется по экспоненциальной зависимости вида

$$C = \exp [f(P_{o1}, P_{o2}, \dots, P_{om})], \quad (17)$$

где $f(P_{o1}, P_{o2}, \dots, P_{om})$ - функции факторов $P_{o1}, P_{o2}, \dots, P_{om}$, влияющих на полезность технологических воздействий.

Для получения численных оценок каждого показателя следует линеализировать зависимость (17) через полином "П":

$$C = \bar{K}_i f_i(P_{oi}) = \bar{K}_i \prod_{i=1}^{i=m} f_i(P_{oi}), \quad (18)$$

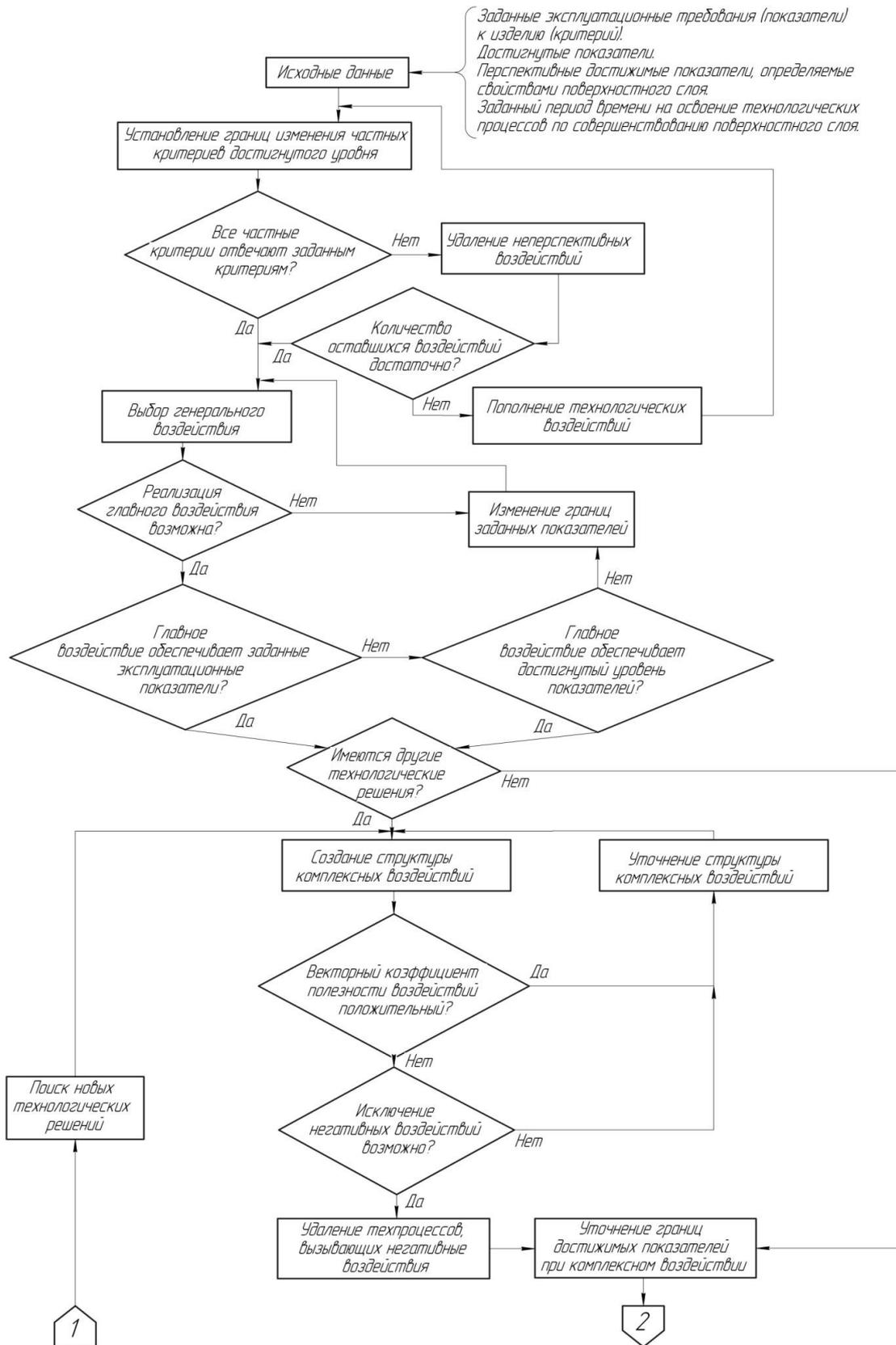
Решение возможно путем наименьших квадратов путем установления "min" в (16). Для этого используют матричный метод в виде $(X'X)A = X'Y$, (19)

где X' - матрица исходных независимых друг от друга достигаемых эксплуатационных показателей;

X - матрица достигнутых показателей;

A - матрица коэффициентов полезности;

Y - матрица заданных показателей.



Тогда

$$A \begin{pmatrix} \bar{K}_1 \\ \bar{K}_2 \\ \dots \\ \bar{K}_n \end{pmatrix}, X \begin{pmatrix} P_{\delta 1} \bar{P}_{\delta 1} \\ P_{\delta 2} \bar{P}_{\delta 2} \\ \dots \\ P_{\delta m} \bar{P}_{\delta m} \end{pmatrix}, Y \begin{pmatrix} P_{p1} \\ P_{p2} \\ \dots \\ P_{pn} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

В (20) \bar{P}_{δ} - комплексный показатель полезности, достижимый за счет нескольких технологических воздействий.

Матрица исходных данных имеет вид

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} P_{\delta 1} & \bar{P}_{\delta 1} \\ P_{\delta 2} & \bar{P}_{\delta 2} \\ \dots & \dots \\ P_{\delta m} & \bar{P}_{\delta m} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

Решение уравнения (20) выполняют в виде обращения матриц

Критериальная оценка вектора полезности различных видов технологических воздействий

Виды воздействий	Способы воздействий	Вектор полезности на эксплуатационные показатели изделий (+ - повышение, - - снижение, 0 – не оказывает существенного воздействия, oo – влияет при особых условиях)					
		Восстановление исходных эксплуатационных свойств	Жаростойкость	Износостойкость	Усталостная прочность	Защита от внешних воздействий	Придание новых эксплуатационных свойств
1	2	3	4	5	6	7	8
Без изменения поверхностного слоя	Химикотермическое *	0	0	+	+	+	oo
	Виброупрочнение	0	0	0	+	oo	oo
Со снятием:							
- припуска	МО** и ЭМО***	+	0	oo	-	-	+
- покрытия	Магнитовибрационное удаление толстых покрытий	+	0	oo	0	0	+
С наращиванием:							
- однородного слоя	ЭЭП****	0	+	+	-	+	+
	Лазер	0	+	+	0	+	+
	Ионоплазменные (ИП)	0	0	+	0	0	+
- слоя с гранульными включениями	Лазер	0	+	+	oo	oo	oo
	ИП	0	+	+	oo	+	oo
	ЭХ*****	oo	+	+	-	0	oo

* электроэрозионное легирование в среде жидких газов
 **МО – механическая обработка

***ЭМО – электрические методы обработки
 ****ЭЭП – электроэрозионное покрытие
 *****ЭХ – электрохимическое покрытие

В таблице не рассматриваются общеизвестные технологические приемы (например, цементация, азотирование, цианирование) достаточно полно освещенные

в справочной литературе. Значительная часть технологических способов и воздействий, приведенная в таблице, находятся на уровне изобретений и пока слабо изучены, хотя их

$$A = (\bar{X}\bar{X})^{-1}(\bar{X}Y), \quad (22)$$

где $(\bar{X}\bar{X})^{-1}$ - обратная матрица, позволяющая при проектировании новых технологий учесть прямое воздействие применяемого способа на эксплуатационный показатель (или показатели) и создать систему адаптивного управления процессом совершенствования состояния поверхностного слоя изделий.

Критерии, определяющие полезность воздействий [3] на поверхностный слой изделий, приведены в таблице. Здесь укрупненно показана критериальная оценка основных воздействий, часть которых может изменять вектор воздействия в зависимости от условий применения способа.

применение в перспективных изделиях весьма желательно.

При наращивании однородного слоя (таблица) удается получить новые свойства материалов при сохранении или восстановлении полезных свойств (коэффициентов полезности) за счет химического и термического воздействия при покрытии материалов, не обладающих, например, высокой степенью защиты от внешних факторов (в частности, коррозии в агрессивных средах), что необходимо для двигателей, работающих с агрессивными топливами.

Включение гранул в покрытия (таблица) открывает возможность переносить их особые эксплуатационные характеристики на всё изделие, сохраняя при этом полезные свойства основного материала. Примером может служить нанесение высокотемпературного покрытия из чугуна на легкоплавкий алюминиевый сплав, имеющий более низкую удельную массу, но слабую защиту от действия агрессивных сред и малую износостойкость.

Более подробно эксплуатационные характеристики изделий с измененными свойствами поверхностного слоя приведены в [3].

Заключение

Предложенный принцип полезности позволил разработать систему критериальной оценки выбора и приоритетов разработки способов технологических воздействий на

поверхностный слой изделий, что дало возможность целенаправленно улучшать характеристики объектов, работающих при высоких механических, термических внешних воздействиях, предел которых в ряде случаев близок к теоретически достижимому показателю.

Рассмотрены временные и затратные ограничения к созданию и использованию новых видов технологических воздействий, что является базой для математического моделирования комбинированных воздействий и проектирования технологических процессов модификации свойств, размеров покрытий поверхностного слоя изделий нового поколения, особенно для авиакосмической отрасли.

Литература

1. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения [Текст] / В.Ф. Безъязычный. - М: Машиностроение, 2012. - 320 с.
2. Смоленцев, В.П. Использование векторного критерия нестрогого предпочтения при выборе допустимых решений [Текст] / В.П. Смоленцев, Н.М. Бородкин // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 8. Часть 2. - Воронеж: ВГЛТА, 2003. - С. 5-15.
3. Сафонов, С.В. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем модификации поверхностного слоя [Текст] / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, А.И. Портных. В монографии «Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты». В 5 т. Т.3; под ред. А.В. Киричека. - М: Изд.дом «Спектр», 2014. - С.365-406.

Воронежский государственный технический университет

THE CRITERIAL SYSTEM IN PLANNING AND USING THE TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR ENHANCING THE OPERATING CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER

S.V. Safonov

The new principle of utility has been developed and substantiated which makes it possible to effectively vary the operating characteristics of the surface layer in products, working under high power loads, temperatures or alternating external impacts. The proposed criterial assessment of technological impacts has provided the scientific justification for applicability of the known types of surface layer creation, and desirability of developing new ones, with account of time and financial constraints. The paper investigates the opportunities and technologies of devising complex processes, which enhance the technological capabilities of actors when creating the new-generation equipment

Key words: utility criteria, system, technologies, constraints, the methods of efficiency evaluation, impacts

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ НАКАТЫВАНИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач

В статье рассматриваются результаты моделирования методом конечных элементов в программном комплексе Deform-3D холодного поверхностного пластического деформирования при накатывании инструментальными плоскостями сферических заготовок из чистого титана. Отмечены проблемы экспериментального и компьютерного анализа напряженно-деформированного состояния заготовки. Выявлены зависимости степени упрочнения поверхности заготовки от количества циклов обработки и усилия сжатия

Ключевые слова: моделирование, накатывание, упрочнение поверхности, сферическая заготовка

Имеется большое количество исследований, посвященных разработке методов поверхностной упрочняющей обработки сопрягаемых трущихся деталей [1,2]. Также предложен метод холодного поверхностного пластического деформирования сферических заготовок накатыванием плоскими поверхностями [3].

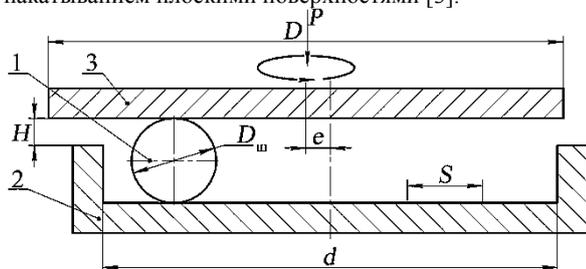


Рис. 1. Схема обработки полной сферы накатыванием

Предварительно обточенную сферическую заготовку 1 (рис. 1) размещали в цилиндрической камере 2. Далее производили обработку плоским вращающимся инструментом 3 со скоростью вращения 750 об/мин. При этом усредненная линейная скорость перемещения заготовки в штампе была около 3 м/с. Усилие прижима составило 2000Н.

Такая технология является перспективной для получения сферических головок эндопротезов тазобедренного сустава человека из биоэнергетного чистого титана. Металлографический анализ и измерения микротвердости показали перспективность создания упрочненной поверхности головок с мелкодисперсной структурой слоя, благоприятной для последующего насыщения азотом. Такая модификация поверхности способствует увеличению ее износостойкости [4,5]. Однако предложенный в [3] способ, являясь мало изученным, имеет ряд технологических параметров, влияющих как на форму получаемой заготовки, так и на равномерность упрочнения поверхности (таких как эксцентриситет между камерой и вращающимся инструментом, коэффициент трения качения, усилие прижима и скорость инструмента и др.). Их неудачная

комбинация может вызывать появление браковочных признаков, например, формирование конической формы заготовки. Также важен такой параметр как время обработки, т.к. при длительной обработке может появиться перенаклеп поверхности с характерным ее растрескиванием.

Получить распределение накопленной деформации ϵ_i и степени упрочнения в поверхностном слое заготовки можно как экспериментально, так и теоретическими расчетами. Однако экспериментально проследить за изменением состояния поверхностного слоя на протяжении всего процесса накатывания, а также изучить влияние технологических параметров на параметры качества поверхностного слоя (глубину, степень упрочнения поверхностного слоя и пр.) для разных диаметров заготовок весьма трудоемко. Проще сделать это моделированием процесса методом конечных элементов используя экспериментально установленные физические свойства обрабатываемого материала. Поэтому одним из важных этапов в подготовке моделирования служит сбор данных о физических свойствах изучаемого материала. В данном случае использовался технически чистый титан ВТ1-0 в отожженном состоянии. Диаметр накатываемой сферы – 28 мм. В связи с тем, что процесс обработки происходит с нагревом заготовки, в расчетах использовались имеющиеся в справочниках кривые упрочнения для интервала температур от 20⁰С до 300⁰С.

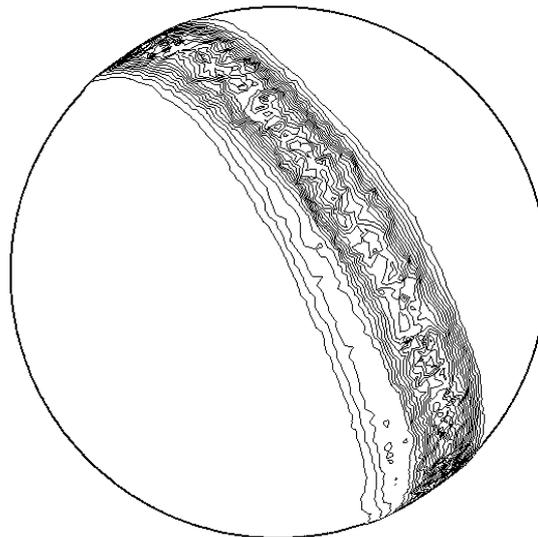


Рис. 2. След пластической деформации заготовки спустя 1 с от начала обработки

Для получения первоначального представления об обработке поверхности сферы пластическим деформированием был смоделирован реальный процесс накатывания с грубой сеткой конечных элементов. Такое упрощение позволяет снизить затраты временных ресурсов и получить достаточную для последующего анализа картину деформаций и напряжений в зоне контакта заготовки с инструментом.

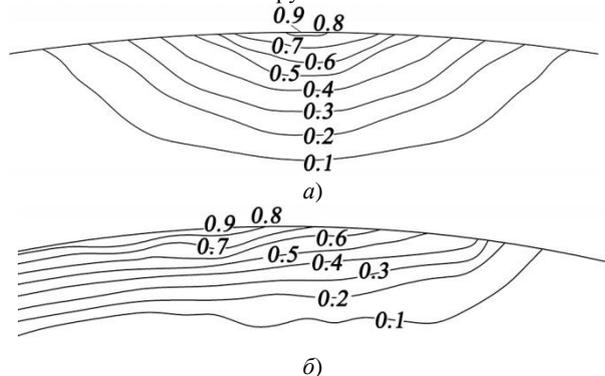


Рис. 3. Распределение накопленной деформации e_i в поверхностном слое заготовки: а) – поперечный разрез, б) – продольный разрез

На рис. 2 в форме изолиний показано распределение накопленной деформации e_i на поверхности шара спустя 1 с после начала обработки. Оно показывает след пластического контакта. Из принципа относительности движения следует, что формы следов пластического контакта, оставляемых шаром на неподвижной нижней и на вращающейся верхней инструментальных плоскостях, одинаковы. На рис. 3,а показано распределение накопленных деформаций за один цикл обработки в поперечном разрезе пластической области на выходе из контакта, а на рис. 3,б – в продольном разрезе.

Для равномерного распределения деформационного упрочнения по поверхности заготовки необходимо постоянное смещение по ней следа пластической деформации. Мерой такого смещения может служить угол между начальной плоскостью вращения контактного следа и на поверхности шара и плоскостью такого вращения в рассматриваемый момент времени.

Одним из этапов анализа деформированного состояния заготовки был процесс моделирования однократного накатывания части поверхности сферы без смещения следа пластических деформаций с различными усилиями прижима инструмента. В ходе моделирования усилие прижима варьировалось от 2кН до 4кН; результаты представлены на рис. 4.

Как видно, вблизи поверхности накопленные деформации при различных усилиях практически пропорциональны соответствующему усилию прижима P

(рис. 5): $e_i = \beta P$, $\beta \approx 5.3 \cdot 10^{-2}$ кН. На основании этого предполагается технологическая инженерная формула для расчета максимальной накопленной деформации на поверхности заготовки при N циклах деформирования:

$$\Sigma e_i = \sum_{j=1}^M \beta N_j P_j,$$

где N_j - число циклов деформирования с силой прижима P_j .

Следует отметить, что с увеличением усилия распределение деформаций по глубине становится менее

равномерным. На глубине поверхностного слоя более 1,8 мм деформации мало зависят от усилия прижима, а на глубине до 0,8 мм наблюдаются значительные различия, как в степени деформирования, так и в характере ее распределения.

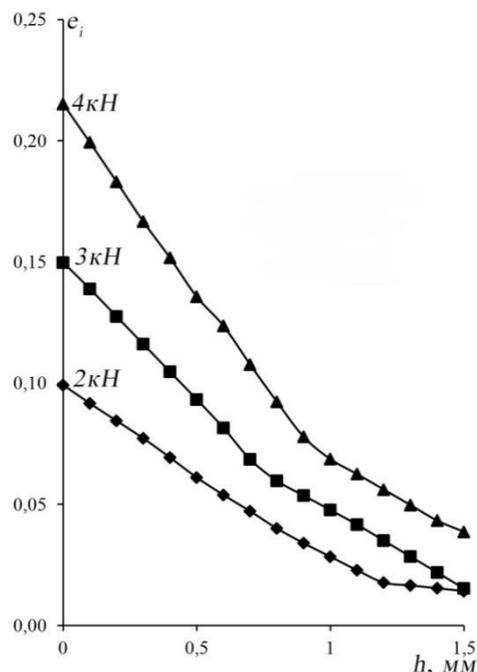


Рис. 4. Сравнение распределения накопленной деформации e_i по глубине h при различных усилиях прижима

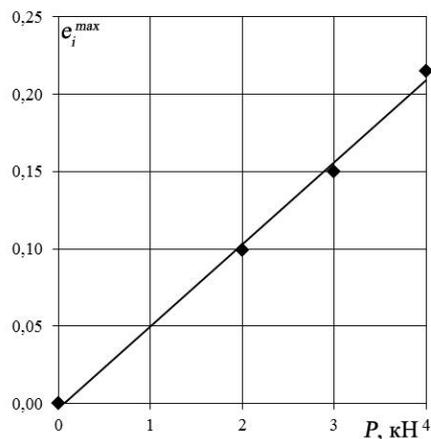


Рис. 5. Максимальные накопленные деформации e_i^{max} при различных усилиях прижима

Одной из важных особенностей обработки предложенным методом является образование напыла материала заготовки на передней и на боковых границах контактной поверхности. Это обусловлено как локальным характером сдавливания сферической поверхности, вызывающим в сочетании с действием сил трения перераспределение материала, так и динамическими эффектами при высокой скорости движения заготовки.

Из графика распределения накопленных деформаций по поверхности сферы (рис. 6) можно выделить области на границе зоны контакта с инструментом, где имеют место повышенные значения накопленных деформаций. В этих местах и идет образование напыла.

Стоит отметить, что такой процесс, как образование напыла является одним из основных источников

деформационного упрочнения поверхности и, как следствие, создания мелкодисперсной структуры поверхности. Такое изменение в структуре благоприятно для последующего насыщения поверхности азотом, т.к. оно увеличивает глубину и качество диффузионного слоя.

Еще одним немаловажным фактором в предложенном методе обработки является траектория движения заготовки по отношению к инструменту, т.к. упрочнение поверхности должно быть равномерно для обеспечения требуемых трибологических свойств и износостойкости получаемого шарнира. Для этого, как указывалось выше, след контакта должен равномерно покрывать сферическую поверхность.

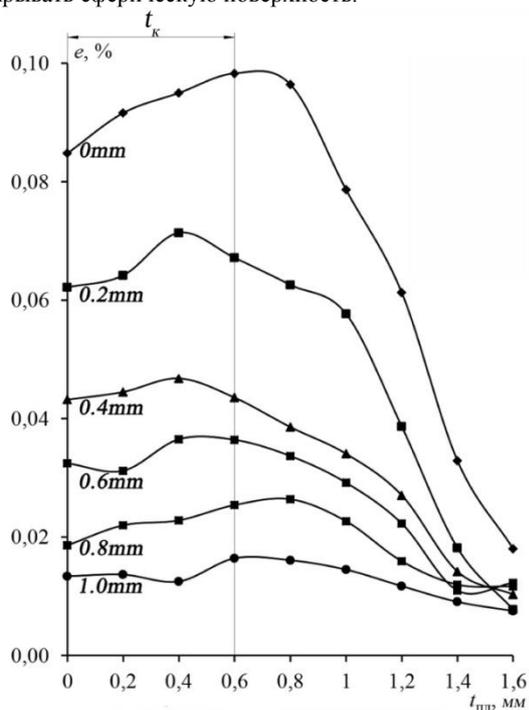


Рис. 6. Распределение накопленных деформаций e_i по ширине пластической области $t_{пл}$ (правая половина) на различных глубинах поверхностного слоя

Так как проследить траекторию контакта, как отдельный параметр, в Deform очень сложно, то было принято решение отслеживать ее через распределение температуры нагрева, как на поверхности сферы, так и на инструментальных плоскостях.

Полученные картины нагрева, как нижней неподвижной плоскости камеры, так и верхней вращающейся инструментальной плоскости оказались идентичными – это окружность начального радиуса (зависит от начального расположения сферы в камере) переходящая в спираль. На рис.7 показано распределение температур по ширине кольцевого температурного следа. Анализ этого графика показывает, что такая закономерность распределения температур обусловлена постоянным радиальным смещением поверхностного источника тепла (пластического следа) от центра к периферии. Поэтому контактный след представляет собой расходящуюся спираль до момента касания боковой кромки. Далее заготовка движется по окружности вдоль цилиндрической стенки неподвижной камеры.

Следует иметь в виду, что при сильном нагреве материала заготовки в контактной зоне может начаться процесс рекристаллизации, который снизит достигнутый положительный эффект деформационного упрочнения и дробления зерен. Поскольку титан обладает низкой теплопроводностью, это явление нужно учитывать для

грамотного проведения технологической операции накатывания.

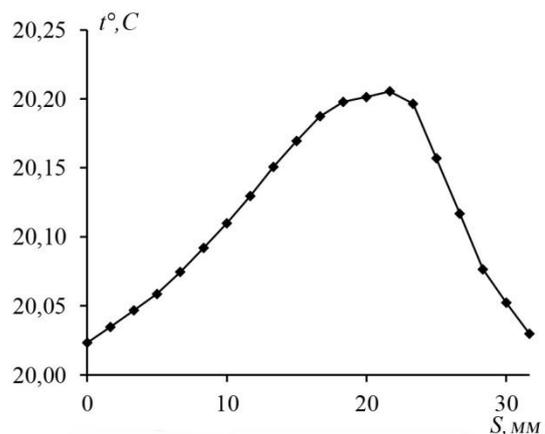


Рис. 7. Распределение температур по ширине кольцевого температурного следа

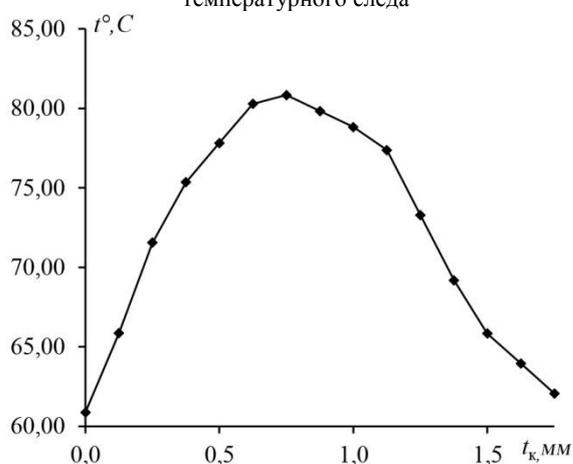


Рис. 8. Распределение температуры по ширине контакта заготовки с инструментом t_k

По результатам компьютерного моделирования установлено, что заготовка при контакте с инструментом без должного отвода тепла достаточно быстро и сильно нагревается (рис. 8). Так в зоне контакта уже через одну секунду после начала обработки температура поверхности достигает $82^{\circ}C$, а температура следа пластической деформации за зоной контакта – порядка $52-55^{\circ}C$, и с каждым циклом обработки идет постепенный разогрев.

Возможность более точного расчета накопленных деформаций с поправкой на разогрев заготовки позволит точнее оценивать и твердость поверхности по всей глубине упрочненного слоя.

Для подтверждения расчетов с учетом температуры в зоне деформаций был выбран процесс накатывания сферической заготовки диаметром 28 мм из сплава ВТ1-0. Усилие прижима составило 3000Н, а скорость вращения инструмента – 351об/мин. Обработка производилась без использования охлаждающей жидкости. Время обработки составило 34с.

Методика, позволяющая оценивать накопленные деформации с учетом среднестатистических закономерностей за весь цикл обработки, основывается на предположении, что, с каждым циклом обработки точки поверхности она упрочняется на равную величину. Кроме этого предполагается, что каждая точка поверхности обрабатывается одинаковое количество раз. Отсюда получается формула:

$$\sum e_i = m \cdot \Delta e_{icp},$$

где $\sum e_i$ - величина накопленных деформаций в конце обработки, Δe_{icp} - величина среднестатистической деформации за один цикл обработки, m – количество циклов обработки.

Пересчитав значения накопленных деформаций по глубине слоя в центральной части контактной области после однократной обработки с учетом количества циклов обработки, получим итоговые значения для выбранных технологических параметров процесса, а затем произведем перерасчет на значения микротвердости согласно торировочному графику для сплава ВТ1-0, который был получен экспериментально.

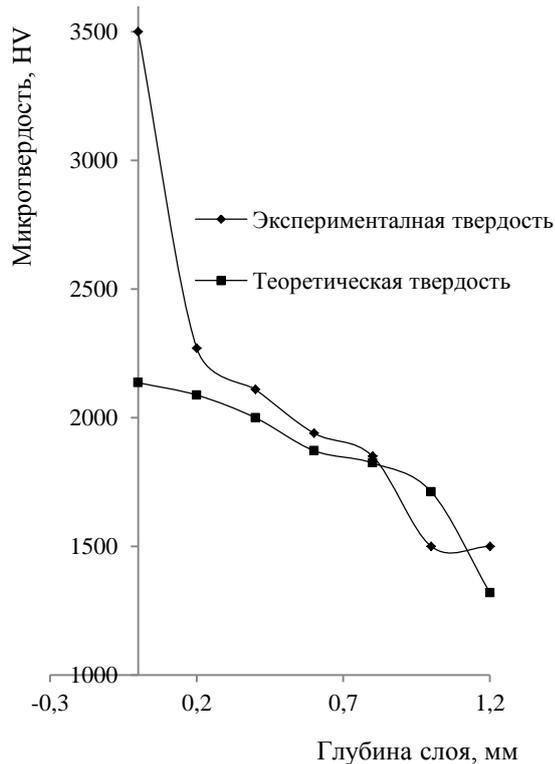


Рис. 9. Распределение твердости по глубине упрочненного поверхностного слоя

На рис. 9 для сравнения приведены расчетные значения твердости и полученные после экспериментального накатывания. На поверхности эти значения заметно разнятся. Такой эффект возникает за счет динамических нагрузок, появляющихся при

искривлении формы сферы сдавливанием и возникновением на ее поверхности напыла, а так же возможностью проскальзывания заготовки относительно инструмента. Циклическое образование напыла и последующее сдавливание неровностей поверхности, им вызванных, в ходе обработки увеличивает значение итоговых деформаций в самом тонком поверхностном слое. Начиная с глубины 0,2мм, значения микротвердости имеют незначительные различия.

Полученные результаты позволяют использовать с достаточной для инженерных расчетов точностью предположенные методики для оценки закономерностей поверхностного упрочнения изделия с помощью данной новой технологии.

Литература

1. Zhu, K.Y. Nanostructure formation mechanism of a-titanium using SMAT [Text] / K.Y. Zhu, A. Vassel, F. Brisset et al. // Acta Materialia – 2004. –Volume 52. –Issue 14. – pp. 4101-4110.
2. Shi, M. Microstructure Refinement and Texture Evolution of Titanium by Friction Roll Surface Processing [Text], M. Shi, Y. Takayama, T. Umetsu, Materials Transactions. –2009. –Vol. 50. –№1. –pp. 210-214.
3. Пат. 2407622 Российская Федерация, МПК6 В24В039/00, Способ обработки сферических изделий поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Шейкин С.Е., Цеханов Ю.А.; заявители и патентообладатели Шейкин С.Е., Цеханов Ю.А. – 2009126405/02 ; заявл. 09.07.2009; опубл. 25.01.2010, Бюл. №2. – 1 с.
4. Валиев, Р.З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации [Текст]/ Р.З. Валиев // Российские нанотехнологии. –2006. – Т.1. – №1-2. –С. 208–216.
5. Белый, А.В. Структура и триботехнические свойства субмикроструктурного титана, модифицированного ионами азота [Текст] / А.В. Белый, В.А. Кукаренко, А.Г., А.Г. Кононов и др. // Трение и износ. –2008.–Т. 29. – №6. –С. 571–577.
6. Цеханов, Ю.А. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании [Текст]: монография / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин. – Воронеж: ВГТА, 2001. –200с. – ISBN 978-5-89040-240-0.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля, Украина, г. Киев

SIMULATION OF DEFORMATION HARDENING AT ROLLING OF SPHERICAL WORKPIECE WITH FINITE-ELEMENT METHOD

Y.A. Tsehanov, S.E. Sheykin, D.V. Karih, D.A. Sergach

The article considers the results of simulations the cold surface plastic deformation due rolling instrumental planes of the spherical workpieces of pure titanium using the finite element software package Deform-3D. Noted the problems of experimental and computer analysis of the stress-strain state of the workpiece. The dependences of the degree of hardening of the workpiece on the number of cycles and compression force were revealed

Key words: simulation, rolling, hardening of the surface, spherical workpiece

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев

В работе приведены материалы по созданию механизма управления эксплуатационными характеристиками изделий путем целенаправленного использования известных и вновь создаваемых методов и средств модификации поверхностного слоя материалов, используемых в современной конкурентоспособной продукции машиностроения, в первую очередь для изделий оборонных отраслей промышленности

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, покрытие, нанесение, удаление, модификация, способы, устройства

В машиностроении успешно развивается направление по улучшению характеристик изделий путем модификации поверхностного слоя материала. Наиболее часто для этих целей применяют металлические покрытия, придающие деталям новые эксплуатационные свойства. Это могут быть тонкие слои с высокой адгезией, толстослойные покрытия, формирующие новый геометрический профиль изделия (например, при восстановлении изношенных деталей в случае ремонта). Покрытия бывают однослойными и многослойными (например, при напылении, плакировании, электроэрозивной модификации, плазменной обработке). В зависимости от эксплуатационных требований могут использоваться различные технологические процессы нанесения покрытий (тепловые, химические, механические и др.).

Иногда требуется подготовить поверхность под последующую обработку (включая нанесение покрытий) путем снятия слоя диэлектрика после, например, окраски, лакирования и других предшествующих операций.

Получило развитие удаление поверхностных загрязнений с применением магнитно-импульсных локальных воздействий на оболочки, имеющие ограниченную жесткость, что позволяет быстро восстановить эксплуатационные свойства изделий.

Наиболее освоены технологии повышения эксплуатационных показателей лезвийного инструмента путем нанесения твердых сплавов на инструментальные стали, что достаточно полно освещено в технической литературе [4;7].

В исследованиях текущего периода большое внимание уделяется созданию процессов покрытия под конкретные цели, закладываемые

разработчиками в конструкции перспективных объектов еще на стадии проектирования машин. Это необходимо в первую очередь для летательных аппаратов и двигателей ракетно-космической отрасли. Здесь получили распространение многокомпонентные покрытия, включающие гранулы материалов с особыми свойствами (например, жаропрочностью, износостойкостью, возможностью работать без смазки и др.), которые могут закрепляться на поверхности тепловым зарастиванием (например, лучевыми методами, наплавкой) продуктами химических реакций, пластическим деформированием, напылением, импульсными воздействиями.

Развивающиеся направления технологического использования покрытий требуют создания оригинальных (на уровне изобретений) способов и устройств, наиболее полно отвечающих запросам разработчиков наукоемкой продукции нового поколения техники.

Способы нанесения металлических покрытий

Металлические покрытия могут наноситься на любые материалы, в том числе диэлектрики (металлизация пластмасс, керамики, плакирование и др.). В машиностроении основная часть металлических покрытий используется для изменения эксплуатационных свойств сплавов. В табл. 1 приведен анализ наиболее употребительных применений таких покрытий.

Имеющиеся ограничения служат основой для выбора рационального способа покрытия с учетом наличия специального оборудования, уровня подготовки специалистов, технико-экономического потенциала предприятия. Использование такой информации открывает возможность грамотной модернизации системы машиностроения и обоснованного создания в этой отрасли предприятий малого и среднего бизнеса, каждое из которых может специализироваться на узкой номенклатуре изделий, более полно загрузить имеющееся оборудование и

Сафонов Сергей Владимирович – ВГТУ, канд. пед. наук, профессор, тел. 8-473-246-29-90, e-mail: safonov@vorstu.ru
Григорьев Сергей Николаевич – МГТУ «СТАНКИН», д-р техн. наук, профессор, тел. 8-499-972-94-00, e-mail: rector@stankin.ru

Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-903-655-99-70, e-mail: vsmolen@inbox.ru

создать долговременные деловые связи с крупными промышленными комплексами, опреде-

ляющими перспективную политику в области машиностроения.

Таблица 1

Эксплуатационные возможности металлических покрытий

№ п/п	Основное назначение покрытий	Основные виды покрытий	Источник информации
1	Защита от внешних воздействий (коррозии) придание товарного вида, обеспечение новых эксплуатационных показателей.	Гальваническое Химическое (окисные пленки, измененные поверхностные слои) Покрытия, получаемые напылением, коагуляцией или в магнитном поле Электроискровое легирование и покрытие Покрытия жидкими металлами (лужение, наплавка и др.)	[4, 7] [3, 4, 7] [1, 3, 4, 10] [3, 7, 22] [3, 5]
2	Повышение износостойкости	Получаемое напылением Лучевые методы (плазма, лазерная наплавка и др.) Электроэрозионное легирование и покрытие Гальваномеханическое и электрохимическое покрытие Покрытие в магнитном поле Нанесение жаропрочных и жаростойких материалов (плазменное, гальваническое, химическое и др.)	[3, 4] [3, 5] [3, 21] [8, 18, 23] [9] [5,6]
3	Энергосбережение (снижение коэффициента трения)	Напыление Гальванические и гальваномеханические Электроэрозионные Электрохимические Химические	[3, 4, 7] [4, 6, 23] [22] [3, 4, 22] [4]
4	Восстановление геометрии и качеств изношенных изделий	Химические (химическое никелирование и др.) Напыление и наплавка Электроэрозионные и электрохимические (однослойные и многослойные) Гальваномеханические Покрытие магнитным порошком	[3, 4, 6] [3, 4, 5] [11, 12, 13, 22] [8, 22] [10]
5	Изменение эксплуатационного назначения изделий	Электроэрозионное покрытие чугуном по стали, чугуном по алюминиевым сплавам	[12, 13, 14, 15]
		Получение покрытия с принципиально новыми характеристиками	10!
		Гальваническое и электроэрозионное покрытие серебром (повышение отражательной способности)	[3, 7]
		Электрохимическое покрытие медью, серебром (повышение электропроводности) и др.	[22]

Наибольшее использование металлические покрытия находят (табл. 1, раздел 1) для защиты от коррозии, сопутствующих процессов (например, от анодного растворения технологической оснастки). Гальванические и химические покрытия достаточно подробно изучены и по этому вопросу имеется хорошая информационная база, часть которой показана в табл. 1.

Основной интерес представляют сведения по новым методам обработки. Так по авторскому свидетельству [1] для поддержания качества наносимой информации, ее защищают от нарушения профиля путем создания на поверхности покрытия слоя полиакриламида (концентрация 3 г/л), который в конце процесса маркирования (за 0,5 – 0,8 с до завершения операции) осаждается на обработанные участки.

По патенту [10] предложен способ повышения защитных свойств заготовок из цветных

(немагнитных) материалов (титановых, алюминиевых, магнитных), путем заполнения местных дефектов магнитным порошком, который направленно перемещается в создаваемых магнитных полях. Рекомендовано в качестве материала для заполнения применять композитные составы, включающие, кроме порошка анаэробный герметик типа УГ – 4Пр. Обработка выполняется в несколько этапов: сначала в магнитном поле в микродефекты вводят композицию (до полного заполнения углубления), после чего поле снимают, незатвердевшие остатки покрытия удаляют жидким растворителем, сушат деталь на воздухе при температуре около 300 -310 К в течение 24 часов и контролируют качество поверхностного слоя на предмет его сплошности.

Покрытия жидкими металлами (табл. 1, раздел 1) достаточно полно изучены в доступ-

ной литературе и в работе подробно не рассматривается.

Из опыта эксплуатации изделий известно, что частичный или полный износ деталей (особенно у высоконагруженных технически сложных изделий) может создать аварийную обстановку или вывести объект (например транспортное средство) из строя. В авиакосмической технике устанавливают научнообоснованные ресурсы для всего средства или отдельных его частей, что гарантирует работоспособность объекта в течение этого срока эксплуатации. Для большинства другой продукции машиностроения такие требования закладываются как ориентировочные. Поэтому требуется подробнее рассмотреть различные методы повышения износостойкости изделий за счет использования покрытий, приведенных в разделе 2 табл. 1. Большинство известных методов достаточно полно освещено в литературе, а имеющиеся ограничения позволяют обоснованно выбрать один из наиболее эффективных методов. Представляют новизну созданные на уровне изобретений новые способы. Так по патенту [8] разработан способ повышения износостойкости поверхности путем гальвано-механического покрытия, сведения о котором приведены в [23]. Новый способ [8] позволяет получать наружные слои с шероховатостью до 0,02 мкм и со стабильными остаточными напряжениями сжатия. Из [23] известно, что износостойкость деталей с покрытиями до 30 раз выше, чем при традиционном хромировании, а ресурс резиновых уплотнений штока с покрытием, работающего в гидроцилиндре, повышается до 40%. Развитием этого метода стал способ по патенту [8], где может наноситься толстый слой качественного покрытия, необходимого для процесса эксплуатации изделия. Способ эрозионно-термической обработки (патент [18]) позволяет создать новый вид электрода – инструмента с металлическим термоактивным покрытием, наносимым с учетом динамики износа при электроэрозионной обработке. На рисунке 1 показано сечение износостойкого электрода с покрытием, например, цинком.

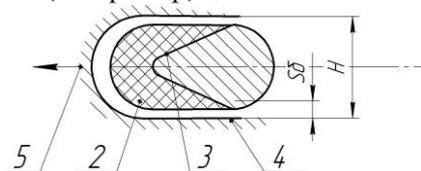


Рис. 1. Электрод – проволока профильного сечения с покрытием. 1 – профильный электрод; 2 – покрытие; 3 – профиль с покрытием; 4 – заготовка; 5 – направление подачи; H – ширина паза в обрабатываемой детали; $S_б$ – боковой зазор

На рис. 1 покрытие, наносимое на проволочный электрод, защищает от интенсивного эрозионного износа материал проволоки, которая выполняется из латуни и имеет ограниченную прочность на разрыв, что может нарушать процесс электроэрозионного разделения заготовок.

Исходный профиль проволоки, применяемой в качестве электрода, имеет круглое сечение. В литературе [22] достаточно полно рассмотрены вопросы нанесения термоактивных покрытий на стандартную круглую проволоку. За счет интенсивного горения при импульсе тока такой инструмент резко увеличивает интенсивность разделения заготовок, но возрастание глубины эрозионных лунок после прохождения проволоки через паз неминуемо вызывает появление шероховатости, свойственной черновой обработке. Применяемые способы повышения качества поверхностного слоя детали после разделения (например, повторная обработка проволокой на чистовых режимах) оказались слишком трудоемкими и малоэффективными, т.к. требовали после каждого черного прохода перенастройки оборудования для работы с проволокой без покрытия и поиска начальной точки для перемещения инструмента при настройке станка.

Способ по патенту [18] позволил совместить операции по черновой и чистовой резке металлических заготовок. Для этого стандартную круглую проволоку, применяемую для электрода – инструмента, протягивают через фильеру, формируя со стороны подачи (5 на рис. 1) каплевидный профиль (3 на рис. 1). На него наносят покрытие (2), способное интенсивно гореть в зоне разряда. Это может быть кадмий или более доступный цинк. В процессе нанесения (чаще гальваническим методом) тыльная сторона проволоки защищена от покрытия (например, диэлектрическим желобом, по которому перемещается проволока в процессе нанесения покрытия). Изменение формы сечения инструмента уменьшает ее поперечный размер, а следовательно ширину паза (H на рис. 1). Повышенная интенсивность эрозионного съема припуска вызывает увеличение бокового зазора ($S_б$ на рис. 1), что практически компенсирует нарушение величины расчетной ширины паза и позволяет выполнять операцию по управляющей программе, полученной для обработки стандартной проволокой без покрытия. Отсутствие покрытия (2 на рис. 1) со стороны стенок паза заготовки (4 на рис. 1) позволяет окончательное формирование поверхностного слоя выполнять участком инструмента, не

имеющим покрытия и получать низкую шероховатость, которая аналогична получаемой с использованием проволоки без покрытия. Таким образом удается совместить высокую производительность (обработка инструментом с покрытием) и чистовой процесс, ранее получаемый при использовании круглой проволоки без покрытия. Дополнительная трудоемкость изготовления электрода - инструмента по патенту [18] многократно перекрывается сокращением времени разделения материала и обеспечением высоких технологических показателей чистового процесса. Снижается также расход электрода - проволоки за счет возможности снижения скорости ее перемотки вдоль паза. Расширяются возможности изготовления деталей из заготовок большой толщины, т.к. здесь может использоваться увеличенное натяжение проволоки без опасения ее обрыва вследствие эрозионного износа.

При использовании инструмента, изготовленного по патенту [9], его рабочая часть становится возобновляемой с геометрией, формируемой локальным магнитным полем, изменяющим состояние реологической жидкости, которая затвердевает по контуру знака для маркирования и удерживается в этом положении полем электромагнитов, в котором сердечником являются съемные знаки (профильные шрифты) из магнитомягкого материала. Такой электрод имеет незначительную твердость, но он вполне пригоден для безизносного (бесконтактного) маркирования, в том числе с переменной информацией.

Нанесение износостойких покрытий, работающих в условиях высоких температур при эрозионном воздействии продуктов обработки (табл. 1, раздел 2), достаточно подробно рассмотрено в [5, 6].

Одним из перспективных направлений применения покрытий является энергосбережение за счет снижения потерь на преодоление трения. Здесь (табл. 1, раздел 3) используются, в основном, известные технологические приемы, а так же новые методы [3, 22 и др.], которые значительно расширяют эксплуатационные возможности изделий. Так приведенный в [22] опыт электроэрозионной обработки с образованием на поверхности плавно сопрягаемых лунок позволяет удерживать здесь смазку при любых контактных усилиях в подшипниках скольжения.

Наращивание покрытий с различной пористостью [23] позволяет заметно снизить трение в поршневой группе двигателей, а включение в покрытие твердых частиц [6] открывает воз-

можность исключить в узлах трения смазку, т.к. в этом случае (например, при лезвийной обработке) ее заменяет более мягкий слой, соединяющий поверхность заготовки с твердыми частицами, воспринимающими контактные силы, определяющие величину трения. Это находит преимущественное применение в различных современных конструкциях (например, в космических аппаратах, кислородных магистралах), где смазка либо испаряется, либо может вызывать взрыв.

В качестве самостоятельной в машиностроении сформировалась отрасль восстановления геометрических размеров и эксплуатационных качеств изношенных деталей (таблица 1, раздел 4). Достаточно освоены покрытия, получаемые нагревом заготовки [3, 4, 5] которое может вызывать коробление изделий, особенно деталей больших габаритов и малой жесткости. Без существенного нагрева выполняются некоторые виды покрытия (химическое, напыление, электроэрозионные и гальваномеханические способы, нанесение слоев в магнитном поле и др.). Здесь наметились новые направления исследований, часть которых защищена патентами.

Для электроэрозионного восстановления размеров и других эксплуатационных свойств чугунных деталей предложен способ по патенту [12], при котором многослойное покрытие наносят чугунным электродом с подготовкой поверхности под очередные слои плазменной очистки.

Технология нанесения покрытия включает:

- сначала без использования плазменной струи на заготовку наносят электродом слой покрытия с толщиной, при которой в нем не образуются трещины (как правило, толщина менее 0,2 мм). Скорость перемещения электрода до 100 мм/мин:

- включают плазматрон и через сопло в среде плазмообразующего газа (например, углекислого с расходом 0,7 – 1,0 м³/час) подают плазменную струю под углом α к поверхности покрытия (α около 30°). С задержкой в несколько секунд на электрод от генератора импульсов поступает импульс тока (напряжение 60 В, сила тока 4 – 5 А). Далее перемещают электрод вдоль первого слоя (скорость 80 – 100 мм/мин) и наносят следующий слой (толщина, как правило, менее 0, 2 мм). Количество слоев может быть любым с получением суммарной толщины покрытия более 1 мм.

Более широкие возможности восстановления стальных или чугунных деталей такими же

покрытиями предоставляет способ [13], который позволяет, кроме этого, изменять назначение изделия, например, сделать стальную деталь коррозионноустойчивой, т.е. отвечает свойствам в разделе 5 (таблица 1). В основе способа [13] лежит возможность перераспределения содержания углерода в чугунном или стальном слое за счет его диффузии в малоуглеродистый сплав. Для получения качественного покрытия необходимо, кроме ограничения толщины каждого слоя, чередовать их положение так, чтобы во всех случаях смежный слой был из малоуглеродистой стали, а поверхностный имел характеристики, учитывающие условия эксплуатации изделий после их восстановления.

Рассмотренный в [23] способ гальвано - механического хромирования реализован в [8] для нанесения слоев покрытия при восстановлении геометрии металлических изделий. Здесь путем изменения технологических режимов удалось создать поверхностные слои, первый из которых быстро осаждается на изношенные участки заготовки и приближает полученный профиль к заданной геометрии детали, но качество такого поверхностного слоя не удовлетворяет эксплуатационным требованиям (трещинообразование, растягивающие напряжения и др.). На завершающем этапе оставшийся припуск на покрытие (10 – 20% от общей величины) наносят при увеличенном давлении на упрочняющий элемент (а значит и по удлиненному циклу) при скорости осаждения не превышающей 1 – 1,2 мкм/мин, что значительно меньше, чем на начальной стадии получения покрытия, но здесь обеспечиваются требуемые эксплуатационные свойства поверхностного слоя изделия. Способ по [8] дает возможность ускоренно получать качественное покрытие, причем без предшествующей (весьма трудоемкой и не всегда осуществимой) операции механического выравнивания профиля заготовки относительно геометрии детали, ускоренно получить восстановленные изделия с минимальной погрешностью (до 4 – 5 квалитета) и микронеровностями (несколько десятых микрона), что можно рассматривать как расширение эксплуатационных возможностей изделия.

По патенту [11] путем последовательного нанесения и удаления покрытий удастся получить качественный информационный массив (например, на платах) для всех участков детали (включая труднодоступные для инструмента места), в том числе на тонкостенных покрытиях на диэлектрическом основании, где съём материала основания не возможен. Известно, что при формировании печатных плат электрохи-

мическим методом тонкие технологические проводники растворяются раньше, чем через них пройдет ток, обеспечивающий удаление расположенных за ними участков покрытия. Для получения качественных деталей перед изготовлением печатной платы на заготовку, имеющую тонкое покрытие фотожелатиновым слоем или фоторезистом устанавливают диэлектрический шаблон с окнами в месте расположения тонких проводников. В этих местах наращивают слой проводника до величины, при которой такой участок в процессе анодного растворения удаленного контура, хотя и растворяется, но до конца получения профиля платы сохраняет возможность подвода тока к изолированным участкам платы и только после этого может окончательно удаляться. Способ осуществляют с использованием тонкостенных диэлектрических шаблонов с просечками по форме проводников тока к информационным знакам. Шаблоны плотно прижимают к заготовке платы, подводят к нему плоский (или фасонный, повторяющий общий контур участков токоподвода) электрод – инструмент (зазор ограничивают 20 – 30 мкм) и при обратной полярности тока подают поливом электролит. В окнах шаблона образуется покрытие из материала инструмента с переменной толщиной (у границ знаков – до толщины шаблона). Затем снимают шаблон, меняют полярность, увеличивают зазор между электродом – инструментом и заготовкой до 0,1 – 0,3 мм, включают принудительную прокачку электролита со скоростью 1 – 2 м/с, что позволяет по нанесенному контуру получить профиль печатной платы, отвечающую стандартам на информационные изделия, и в конце процесса полностью устранить токоподвод к знакам.

В рассматриваемом разделе 5 (табл. 1) приведена достаточно подробная информация по нанесению покрытий изменяющих эксплуатационное назначение изделия. Так по патенту [14] стальной или чугунной детали удастся придать характеристики, свойственные в основном наносимому материалу (например, повышение защиты от коррозии стальных деталей с чугунным покрытием, улучшение антифрикционных характеристик и др.). По [14], управляя режимами нагрева и охлаждений зоны нанесения покрытий, удастся получить износостойкие слои переменной толщины, устраняющие поверхностные дефекты (в том числе концентраторы напряжений) и обеспечивающие требуемые эксплуатационные качества восстановленной детали. В основу изобретения положены режимы термообработки материалов, ко-

торые гарантируют формирование требуемых свойств покрытия.

Нанесение чугунного покрытия на алюминиевые сплавы стало возможным при применении патента [15], где используется комбинированная электроэрозионная и химическая обработка (берутся известные флюсы, рекомендованные для сварки алюминиевых сплавов). Здесь решена задача получения высокотемпературных слоев на легких металлах с низкой температурой плавления. Без флюса нагрев в зоне покрытия вызывал появление под туго-

плавкой окисной пленкой местных разрушений материала основы, что вызывало брак деталей.

Удаление покрытий

В промышленности имеются случаи, когда покрытие нарушает эксплуатационные требования и его необходимо удалить (например, для считывания информации с деталей, имеющих лакокрасочные покрытия, для ремонта, контроля и испытаний, обеспечения токоподвода и др.). В табл. 2 приведены типовые способы удаления покрытий с целью восстановления или обеспечения эксплуатационных свойств изделия.

Таблица 2

Обеспечение эксплуатационных свойств изделий путем удаления покрытий

№ п/п	Удаляемое покрытие	Основные способы		Источник информации
		нанесение	удаление	
1	Диэлектрические защитные и декоративные:			
	-тонкие	Химические преобразования (окислы, фоторезисторы, лаки) Механическое покрытие, напыление	зачистка	[19]
			травление	[3, 6]
			зачистка виброобработка травление	[6]
-толстые	Окрашивание Осаждение Напыление Обмазка	Зачистка	[19]	
		Травление	[6]	
		Ударное механическое	Справочники	
2	Диэлектрические загрязнения:			
	-с высокой адгезией	Осаждение продуктов обработки и частиц из окружающей среды	Промывка в химически нейтральных и агрессивных средах при различной температуре	[7, 22]
			Зачистка	[19]
	-уплотненный сыпучий или хрупкий сплошной материал	Налипание на стенки тары. Участки местного покрытия керамикой на литой заготовке после литья в керамические формы	Виброобработка Магнито-импульсная очистка Механические ударные воздействия	[16, 20]
3	Металлические:			
	-тонкие	Химический Гальванический Металлизация Плакирование Напыление Лужение и др.	Травление	[3, 6]
			Зачистка	[2, 19]
			Электрические методы обработки	[22]
			Гидроабразивная обработка	[17, 21]
	-толстые	Наплавка Напыление Электроэрозионное покрытие Гальваномеханическое покрытие Сборка из металлических элементов	Лучевой (плазменная резка и др)	[5]
			Зачистка	[3, 4, 19]
Механические Ударные воздействия			[3]	
		Разборка	[6]	

Диэлектрические покрытия достаточно полно рассмотрены в справочной, учебной и монографической литературе. Однако локальная зачистка диэлектрических покрытий и за-

грязнений на металлическом материале [19] позволяет удалить наружный слой, не повреждая участок обработки (в том числе, не нару-

шая шероховатости). Схема осуществления способа приведена на рис. 2.

Способ по [19] осуществляется в 2 этапа: вначале электрод – щетка 1 подключают к источнику тока 4 при обратной полярности (деталь 5 – катод), а силу тока между пучками проволоки 2 и деталью 5 контролируют по амперметру 3 и поддерживают постоянной через регулировку напряжения (3 – 5В). Ток протекает сначала через электролит, минуя диэлектрик 6.

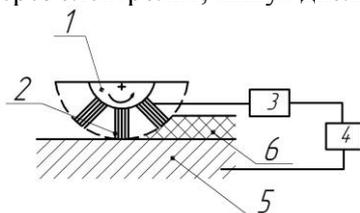


Рис. 2. Схема локальной зачистки токопроводящей детали металлической щеткой: 1 – электрод – щетка; 2 – пучок проволоки; 3 – амперметр; 4 – источник постоянного тока; 5 – деталь; 6 – диэлектрическое покрытие

После появления в начале обрабатываемого участка металлического контакта между деталью и проволокой полярность переключают на обратную и зачищают заготовку до стабилизации величины тока (для щетки диаметром 200 мм с пучками из латунной проволоки диаметром 0,15 мм при начальном прижме пучка 0,2 мм сила тока составляет 3 – 4 А, а время обработки 4 – 5 секунд на 1 мм² площади удаляемого покрытия).

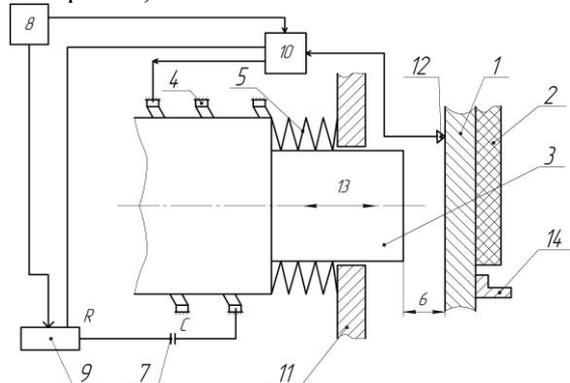


Рис. 3. Схема взаимодействия элементов устройства при магнитно-импульсном удалении толстых загрязнений с оболочек и тонких стенок: 1 – очищаемая деталь; 2 – загрязнение; 3 – боек; 4 – возбудитель электромагнитных воздействий; 5 – упругий элемент (пружина); 6 – зазор между бойком и деталью (настроечный элемент); 7 – батарея конденсаторов; 8 – источник тока; 9 – регулируемое сопротивление (настроечный элемент); 10 – регулятор частоты ударов бойка (настроечный элемент); 11 – корпус для установки бойка; 12 – датчик регулятора частоты ударов; 13 – вектор ударного перемещения бойка; 14 – упор для создания колебаний на очищаемой детали

Для удаления уплотненных сыпучих загрязнений и участков хрупких керамических покрытий предложен способ по [20]. Схема применения приведена на рис. 3.

Технология очистки детали 1 со слоем загрязнения 2 осуществляют бойком 3 от возбудителя 4 электромагнитных колебаний. Настройку бойка 3 регулируют относительно детали 1 до образования зазора 6, меньшего, чем предельное перемещение бойка 3. Силу удара бойка 3 настраивают изменением емкости конденсаторов 7, для чего на образец детали 1 на стенде наносят серии ударов бойком 3, увеличивая емкость конденсаторов 7 (а, следовательно, и силы удара) до получения визуально наблюдаемой вмятины, после чего снижают емкость конденсаторов до исчезновения вмятины и принимают эту емкость за рабочую величину. Способ поясняется на примере очистки от формовочной земли тары со стенкой из алюминиевого сплава толщиной 1 мм и со слоем загрязнения 10 – 15 мм. В качестве макета стенки берут пластину из того же сплава толщиной 1 мм и с размерами 100 x 100 мм, наносят на нее слой загрязнения толщиной 10 – 15 мм устанавливают образец в жесткую рамку, содержащую конструктивные элементы жесткости по контуру пластины и бойком при единичных воздействиях возбудителя ударяют в центральную часть пластины. Первые удары производят при емкости конденсаторов 100 мФ, затем емкость повышают до 150 мФ и далее через 50 мФ. Визуально наблюдают отсутствие вмятин на поверхности пластины в месте удара бойком. В рассматриваемом случае при 200 мФ наблюдалась остаточная вмятина, после чего емкость конденсаторов была снижена до 180 мФ. При полученном режиме на установке были замерены амплитуды колебаний тары вблизи бойка 3. Амплитуда изменялась от 1 до 4 мм. При этом слой загрязнения был удален через 5 секунд с площади 600 см². В случае удаления слоя загрязнения путем ударов вручную понадобилось бы 20 – 25 секунд (при этом возникали недопустимые вмятины в оболочке), а при магнитно-импульсной очистке время составило менее 1 – 2 секунд. Это показывает возможность интенсификации удаления слоя загрязнения до 15 раз. По предложенному способу очистки повреждений оболочки в таре не наблюдалось, повторная очистка тары не понадобилась.

Если деталь (рис. 3) имеет высокую жесткость и не удается придать ей колебательные движения, аналогичные показанным в [20], то для удаления сыпучих материалов (например, кусков руды из открытых вагонов в зимнее время) предлагается использовать по [16] специальный инструмент типа кольцевого бура, оснащенного ножами, спиральными шнеками,

вибраторами, приводами вращения буров. Удаление материалов выполняется несколькими параллельно работающими инструментами, которые формируют на всю глубину очищаемой емкости кольцевые каналы с кернами большого диаметра (800 – 1000 мм). Далее подачу и вращение инструментов прекращают, включают реверсивное вращение буров, что вызывает поворот режущих ножей с утопанием в сторону кернов и их подрезку в донной части. Затем перемещают керны вдоль оси до выхода их из каналов. одновременно создают вибрацию инструмента в поперечном направлении, что приводит к разрушению перегородок из очищаемого материала и удалению его из емкости под действием гравитационных сил. После подъема кернов в крайнее верхнее положение направление вращения инструментов реверсируют, ножи утопают и перестают удерживать керн, он падает, создавая вибрацию тары и разрушение крупных кусков очищаемого материала с последующим удалением его через люки в донной части емкости. Затем буры перемещают и повторяют процесс до полного удаления материала из емкости и со стенок тары.

Рассмотрен процесс удаления шаржированного слоя, возникающего при гидроабразивной резке, особенно, вязких материалов. Для этого создают комбинированный способ обработки [17], в котором за счет анодного растворения со стенок образующегося паза с абразивными вкраплениями удаляется слой не менее 2/3 размера зерна, после чего абразив осыпается и удаляется струей жидкости, подаваемой под давлением более 400 МПа. Устранение шаржированного слоя позволяет в ряде случаев исключить последующую обработку места разделения заготовки, особенно в случае использования этих поверхностей для формирования нерабочих элементов конструкции, где последующий съем припуска может отсутствовать.

В авторском свидетельстве [2] для анодного удаления локальных участков металлических покрытий токопроводами на базе серебра осуществлена подача тока к автономным участкам через токопроводящие пленки с содержанием серебра, что создало условия для удаления остатков предшествующей обработки.

При использовании способа по [2] достигается улучшение качества изделий путем удаления участков металлических покрытий, изолированных от основного токопровода на диэлектриках, или же удаления металлических остатков на стенках отверстий в диэлектриках. Для этого электрохимическую обработку ведут

в электролите, основой которого является ортаботанный проявитель, например метол – гидрохиноновый, содержащий в виде мельчайших взвешенных частиц серебро (0,0036 – 0,006 мас.% от общей массы электролита) при напряжении в начальный период времени в 10 – 12 В до того времени, когда величина тока уменьшится на 40 – 50 % от начального значения. После этого напряжение повышают до 20 – 24 В и ведут процесс до полного прекращения тока с последующей промывкой обрабатываемой поверхности в ультразвуковом поле. Токоподвод к участкам покрытия в процессе их электрической обработки осуществляется за счет наличия на поверхности диэлектрика токопроводящей пленки из частиц серебра, адгезировавшихся из электролита. Серебро также анодно растворяется в процессе удаления металлических остатков, однако наличие в электролите реагента-восстановителя, как составной части отработанного проявителя, способствует образованию токопроводящей пленки вновь и таким образом процесс удаления металлических «островков», изолированных от токопровода, продолжается до полной очистки изделия.

Заключение

Показано влияние покрытий на эксплуатационные свойства изделий. Рассмотрены вопросы обоснованного нанесения и удаления поверхностных слоев в зависимости от условий работы деталей в механизме.

Приведены сведения по управлению процессом формирования поверхностного слоя путем нанесения или удаления покрытий с известными свойствами.

В работе, наряду с известными технологическими приемами для обеспечения высокого качества изделий с покрытиями, рассмотрены новые (на уровне изобретений) способы и устройства, направленные на получение повышенных эксплуатационных характеристик материалов, особенно востребованных при создании наукоёмкой техники новых поколений.

Литература

1. А.с. 941143 (SU) , МПК В 23 Р. Способ электрохимического маркирования [Текст]/ В.П. Смоленцев и др. - №2951958; заявл. 07.07.1980; опубл. 07.07.1982, Бюл. № 25.
2. А.с. 1299719 (SU) , МПКВ 23Н. Способ электрохимической обработки металлических покрытий на диэлектриках [Текст]/ В.П. Смоленцев и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский политехнический институт. - № 3901794; заявл. 19.03.1985; опубл. 13.03.1987, Бюл. № 12.
3. Гадалов, В.Н. Химико-термическая, электрофизическая обработка металлов, сплавов и гальванических покрытий [Текст] / В.Н. Гадалов, В.Р. Петренко, В.В.

Пешков, С.В. Сафонов. - М.: Аргмак – Медиа, 2013. – 320 с.

4. Григорьев, С.Н. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента [Текст]/ С.Н. Григорьев, М.А. Волосова. - М: Янус – К., 2007. – 324 с.

5. Кадырметов, А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров [Текст]/ А.М. Кадырметов. - Воронеж: Научная книга, 2013. – 260 с.

6. Коптев, И.Т. Конструктивные особенности и технология изготовления деталей ракетных двигателей нового поколения [Текст]; под ред. И.Т. Коптева, В.П. Смоленцева / сб. научн. тр. - Воронеж: ВМЗ, 2014. – 190 с.

7. Сулов, А.Г. Научно-технические технологии в машиностроении [Текст]; под ред. А.Г. Сулова. - М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

8. Пат. 2224827 Российская Федерация, МПК С25D. Способ гальваномеханического восстановления токопроводящих деталей [Текст]/ Жачкин С.Ю. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2002102130; заявл. 23.01.2002; опубл. 27.02.2004, Бюл. № 6.

9. Пат. 2229966 Российская Федерация, МПК В 23Н. Электрод – инструмент для электрохимического маркирования и способ его изготовления [Текст]/ Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2002120017; заявл. 22.07.2002; опубл. 01.06.2004, Бюл. № 16.

10. Пат. 2240910 Российская Федерация, МПК В23Р. Способ восстановления изделий из немагнитных материалов [Текст]/ Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Некрасов А.Н.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2003135531; заявл. 05.12.2003; опубл. 27.11.2004, Бюл. № 33.

11. Пат. 2314367 Российская Федерация, МПК С25D. Способ электрохимической обработки информационных изделий [Текст]/ Смоленцев В.П., Кириллов О.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2006109002; заявл. 21.03.2006; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

12. Пат. 2318637 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ электроэрозионного восстановления чугуновых деталей [Текст]/ Смоленцев В.П., Кириллов О.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2006113860; заявл. 24.04.2006; опубл. 10.03.2008, Бюл. № 7.

13. Пат. 2343049 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ получения многослойного покрытия на восстанавливаемой стальной или чугунной детали [Текст]/ Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский механический завод. - № 2006140558; заявл. 16.11.2006; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.

14. Пат. 2396153 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ электроэрозионного восстановления деталей из стали или чугуна [Текст]/ Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский механический завод. - № 2008120420; заявл. 22.05.2008; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.

15. Пат. 2405662 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ нанесения чугунного покрытия на алюминиевые сплавы [Текст]/ Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский механический завод. - № 2009116031; заявл. 27.04.2009.; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34.

16. Пат. 2441717 Российская Федерация, МПК В08В. Способ и устройство для очистки открытых емкостей от уплотненных сыпучих материалов [Текст]/ Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский механический завод - № 2010100363; заявл. 11.01.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.

17. Пат. 2465994 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ устранения эффекта шаржирования при гидроабразивном разделении вязких металлов [Текст]/ Смоленцев В.П., Гончаров Е.В., Печагин А.П.; заявитель и патентообладатель Воронежский механический завод - № 2011105507; заявл. 14.02.2011; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 31.

18. Пат. 2466835 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ эрозионно-термической обработки [Текст]/ Коденцев С.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2009143234; заявл. 21.11.2009.; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32.

19. Пат. 2515604 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ локального удаления диэлектрических покрытий [Текст]/ Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2012104252; заявл. 07.02.2012.; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

20. Пат. 2516523 Российская Федерация, МПК В08В. Способ очистки изделий от загрязнений [Текст]; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2011148556; заявл. 29.11.2011; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

21. Сулов, А.Г. Машиностроение. Энциклопедия. Т.1-3; под ред. А.Г.Сулова. - М.: Машиностроение, 2000. - 840 с.

22. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки [Текст]/ Е.В. Смоленцев. - М.: Машиностроение, 2005. – 509 с.

23. Чижов, М.И. Гальваномеханическое хромирование деталей машин [Текст]/ М.И. Чижов, В.П. Смоленцев. - Воронеж: ВГТУ, 1998. – 162 с.

Воронежский государственный технический университет

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

THE ENHANCEMENT OF THE OPERATIONAL PROPERTIES OF PRODUCTS BY COATING DEPOSITION AND REMOVAL

S.V. Safonov, S.N. Grigoriev, V.P. Smolentsev

The article presents the materials, concerning the creation of a mechanism for regulating the operational parameters of products through the focused use of the known and newly developed methods and means of modifying the surface layer of materials applied in modern competitive mechanical engineering products (primarily, those of the defense industry)

Key words: operational properties, coating, deposition, removal, modification, methods, facilities

МУЛЬТИПАРАДИГМАЛЬНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ДЕФЕКТОВ ПРОГРАММНЫХ И АППАРАТНЫХ СИСТЕМ

А.О. Данилин, М.Д. Кол, Г.В. Петрухнова

В статье рассмотрен жизненный цикл дефектов в перспективе современной методологии управления инцидентами программных и аппаратных систем. Осуществлён анализ существующих на данный момент парадигм управления жизненным циклом дефектов. Предложен мультипарадигмальный подход при работе с базой данных дефектов

Ключевые слова: обеспечение качества, жизненный цикл дефектов, макро-описание, мультипарадигмальная методология, база данных дефектов

Введение. Дефектом принято считать изъян, некорректное поведение как программных, так и аппаратных систем на то или иное действие. Причиной возникновения дефектов могут быть ошибки программные, технические и архитектурные. К программным ошибкам следует относить все недочёты, связанные с несовершенством исходного кода конечного продукта.

Для предотвращения дефектов разработчики программного обеспечения (ПО) и специалисты в области схемотехники как правило используют одни и те же информационные средства, которые, по сути, относятся к категории систем, предназначенных для отслеживания ошибок. Главным компонентом таких систем является база данных дефектов (БДД), которая содержит сведения обо всех выявленных в процессе жизненного цикла продукта дефектах. Все записи представляются в текстовом виде. В большинстве случаев подобного функционала недостаточно, чтобы воспроизвести найденную проблему на стороне разработчика.

Анализ современной методологии управления жизненным циклом дефектов. Полный цикл жизнедеятельности дефектов и работы с БДД может быть представлен в виде универсальной пятиступенчатой структуры (рис. 1).



Рис. 1. Функциональная схема жизнедеятельности дефектов

На представленном рисунке продемонстрировано взаимодействие компонентов для типового процесса обработки единичного дефекта. Приведённая схема представляет собой упрощённый механизм работы с БДД, и может быть применима как для единичного инцидента, так и для десятка выявленных дефектов. Несмотря на кажущуюся универсальность, данная модель взаимодействия имеет свои специфические недостатки, которые, так или иначе, сводятся к проблеме принятия решений непосредственно разработчиками. Так, после выявления дефекта (специалистом по качеству или разработчиком/схемотехником) ему назначается приоритет и определяется критичность. После того, как описание дефекта получил разработчик, начинается процесс воспроизведения инцидента. В случае если удалось добиться воспроизведения, разработчик переходит к устранению проблемы, по окончании чего снова проверяет дефект на воспроизводимость. В случае, когда дефект не удаётся повторить на стороне разработчика, он переходит в состояние «Закрыт», т.е. считается устранённым или отсутствующим. При этом на каждом из этапов затрачивается время, не относящиеся к технической стороне выявления или устранения дефекта, например, время создания первичного описания инцидента (1) складывается из времени воспроизведения выявленного дефекта (T_B), времени непосредственной разработки описания (T_O) и времени настройки (T_H), затрачиваемое на создание описания конфигураций:

$$T_C = T_B + T_H + T_O \tag{1}$$

Аналогичным образом складывается время воспроизведения на стороне разработчика и время проверки устранения дефекта, рассчитываемые по формуле (2):

$$T_{P/П} = T_{И} + T_B + T_C, \tag{2}$$

где $T_{И}$ – время идентификации, затрачиваемое на восприятие описания и понимание сути описываемой проблемы; T_C – время проверки соответствия реального поведения с описанием выявленного дефекта.

Описываемые выше формулы подтверждают, что происходит увеличение временных затрат на

Данилин Артем Олегович – ВГТУ, аспирант, e-mail: pushnir@rambler.ru

Кол Максим Дмитриевич – ВГТУ, магистрант, e-mail: kolmax93@gmail.com

Петрухнова Галина Викторовна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: petruhnova@pochta.ru

действия, которые по своей сути являются наименее трудоёмкими из всех задействованных в технологическом процессе разработки. Причина этого кроется в отсутствии оптимизации и нехватки возможностей существующих систем отслеживания дефектов.

Помимо неоправданного увеличения времени процессов разработки и обеспечения качества конечного продукта современная методология управления жизненным циклом дефектов (ЖЦД) не обладает способами контроля изменения состояния каждого из выявленных дефектов. Более того данные об устранённых дефектах, как правило, не фигурируют в дальнейшем технологическом процессе, что может провоцировать увеличение трудозатрат на те проблемы, которые были выявлены прежде. Так, среди средств микроэлектроники наглядно прослеживаются все описанные выше недостатки (табл. 1 и 2). Аналогичная ситуация обстоит с ПО в области информационных систем и GIS-разработок (табл. 3 и табл. 4).

Таблица 1

Конкретизация БДД проектов микроэлектроники на момент сдачи учитываемых при оставлении статистики проектов.

Масштаб проектов (размер БДД)	Активные дефекты на момент сдачи проекта	Дефекты, открытые после устранения, %
Несколько десятков записей	В диапазоне от 11,1% до 16,1%	БДД: 8,3 АБДД: 72,7
Несколько сотен записей	В диапазоне от 5,8% до 10,8%	БДД: 0,4 АБДД: 40,4
Несколько тысяч записей	В диапазоне от 11,9% до 16,9%	БДД: 4,8 АБДД: 6,3

Таблица 2

Конкретизация БДД проектов микроэлектроники на момент сдачи учитываемых при оставлении статистики проектов.

Масштаб проектов (размер БДД)	Дефекты, требующие детализации, %	Дефекты, которые не удалось повторить, %
Несколько десятков записей	БДД: 5,5 АБДД: 13,8	БДД: 5,5 АБДД: 13,8
Несколько сотен записей	БДД: 0,5 АБДД: 4,9	БДД: 5,8 АБДД: 42,8
Несколько тысяч записей	БДД: 0,5 АБДД: 8,5	БДД: 5,1 АБДД: 10

Приведённые данные табл. 1 и табл. 2 основаны на статистических сведениях проектов, введённых в эксплуатацию и используемых на предприятиях на территории России [2]. Были проанализированы проекты с количеством записей в БДД от нескольких десятков до десятка тысяч с длительностью жизненного цикла проектов до 7 лет. Указанные числовые значения после аббревиатуры БДД

показывают процентное соотношение к числу всех записей дефектов; значения после аббревиатуры АБДД – процентное соотношение к числу записей активных дефектов.

На примере проектов сферы микроэлектроники прослеживается следующая тенденция. Во-первых, количество активных дефектов на момент сдачи учитываемых при оставлении статистики проектов в среднем составляет десятую часть от общего числа выявленных. Указанный в табл. 1 диапазон значений зависит от процента «специальных» дефектов, т.е. тех дефектов, которые не могут быть исправлены в соответствие с внутренними политиками организации или имеют специфическую отметку в БДД. При этом для исследуемых групп проектов процент «специальных» дефектов составил 5%. Обращаясь к оценкам уровня качества [3], следует отметить, что технические проекты или ПО, содержащие 10% активных дефектов, могут удовлетворять критериям качества (так, с ними может согласиться заказчик), но при условии, что нет ни одного дефекта с приоритетом устранения выше среднего.

Таблица 3

Конкретизация БДД проектов разработки ПО.

Масштаб проектов (размер БДД)	Активные дефекты на момент сдачи проекта	Дефекты, открытые повторно, %
Несколько сотен записей	В диапазоне от 1,3% до 6,3%	БДД: 0,5 АБДД: 40,0
Несколько тысяч записей	В диапазоне от 10,5% до 15,5%	БДД: 2,8 АБДД: 26,6

Таблица 4

Конкретизация БДД проектов разработки ПО.

Масштаб проектов (размер БДД)	Дефекты, требующие детализации, %	Дефекты, которые не удалось повторить, %
Несколько сотен записей	БДД: 0,7 АБДД: 60,0	БДД: 5,1 АБДД: 40,0
Несколько тысяч записей	БДД: 0,5 АБДД: 4,7	БДД: 5,1 АБДД: 48,5

При составлении статистики учитывались все группы дефектов (от низкого приоритета устранения до максимального). Во-вторых, следует отметить, что отсутствие устойчивых механизмов воспроизведения дефектов не позволяет в автоматическом режиме осуществлять их контроль, тем самым увеличивается время «жизни» дефектов. Подобная взаимосвязь формирует ложное представление о трудоёмкости исправления подобных инцидентов и не позволяет получить корректную статистику, как по работе сотрудников, так и по проекту в целом. В-третьих, определённый процент дефектов, требующих детализации, свидетельствует, что созданное описание инцидента оказалось вне понимания разработчика, а также что на попытку его воспроизведения было затрачено время, которое снизило веро-

ятность своевременной сдачи проекта или качества разработки как такового. Под открытыми повторно дефектами понимают инциденты активные на момент сдачи проекта, которые в ходе тестирования были устранены (или должны были быть устранены), но по каким-либо причинам возникли вновь.

На основании сведений приведённых выше таблиц очевидно, что количество инцидентов, которые не удалось повторить, превышает 5% (по отношению ко всей базе дефектов) и составляет практически половину активных дефектов как для проектов аппаратных систем, так и для ПО. Если учитывать, что ряд дефектов, которые не удалось воспроизвести, был автоматически исправлен в течение жизненного цикла разработки, то следует также обратить внимание на то, что инциденты могли всего лишь стать скрытыми или перерасти в более критичные.

Данные табл. 1 и 2 также свидетельствуют о наличии от 6,3% (для проектов с БДД в несколько тысяч записей) до 72,7% (для небольших проектов) повторно открытых дефектов в АБДД. Наличие подобных инцидентов значительно сказывается как на качестве конечного продукта (ставит под сомнения достигнутый уровень качества), так и на сроках сдачи проекта, увеличивая время разработки, на длительность периодов повторного выявления обнаруженных ранее дефектов, их поиска в БДД, что в полной мере свойственно парадигме текстового описания.

Перечисленные выше аргументы и недостатки современной методологии управления ЖЦД тормозят развитие сферы высоких технологий и препятствуют продуктивному менеджменту на проектах, связанных с разработкой программно-аппаратных систем. Переломить столь «порочный» путь дальнейшего развития возможно через изменение подхода к ведению и обработке данных БДД. Для этого следует пересмотреть существующую методологию в сторону расширения возможностей средств работы с БДД, их применения, а также использования конечных результатов в процессах управления и обеспечения качества.

Методология расчётов уровня качества ПО.

Текстовое описание выявленных дефектов породило одну единственную парадигму в цепи управления ЖЦД. Её преимущества и недостатки были освещены выше. О мультипарадигмальности в отношении работы с дефектами целесообразно говорить при существовании нескольких идеологий или парадигм создания дефектов, их обработке в БДД и дальнейшем использовании после подтверждения или признания их наличия.

Следует также понимать, что каждый дефект может иметь множество зависимостей и способов воспроизведения, особенно если доступ к БДД конкретного проекта открыт для десятка, сотни или тысячи сотрудников. Учесть все особенности влияния возникших дефектов на разрабатываемый продукт возможно посредством детализации блока принятия решений. Подробный механизм обработки

дефектов [4] согласно методологии мультипарадигмального управления представлен на рис. 2.

Данный механизм включает в себя две многоступенчатые задачи (создание описание нового дефекта и корректировка уже созданного), причём между ними существует различие в области технической реализации системы обработки: с точки зрения подхода к созданию новой записи БДД – задействованы одни процессы, а с точки зрения приоритизации устранения – совершенно иные. Так, при создании описания нового дефекта этап «Анализ и корректировка дефектов» может быть включён в блок «Разработка описания выявленного дефекта». В данном случае блок приоритизации устранения дефекта также будет относиться к этапу разработки описания. Здесь следует заметить, что приоритизация устранения выявленных дефектов является не только гибким средством воздействия на БДД, но и настраиваемым инструментом, отвечающим требованиям конкретного проекта. Также при создании описания нового дефекта блок анализа и корректировки может следовать после приоритизации, которая находится в тесной зависимости от данного блока управления ЖЦД.

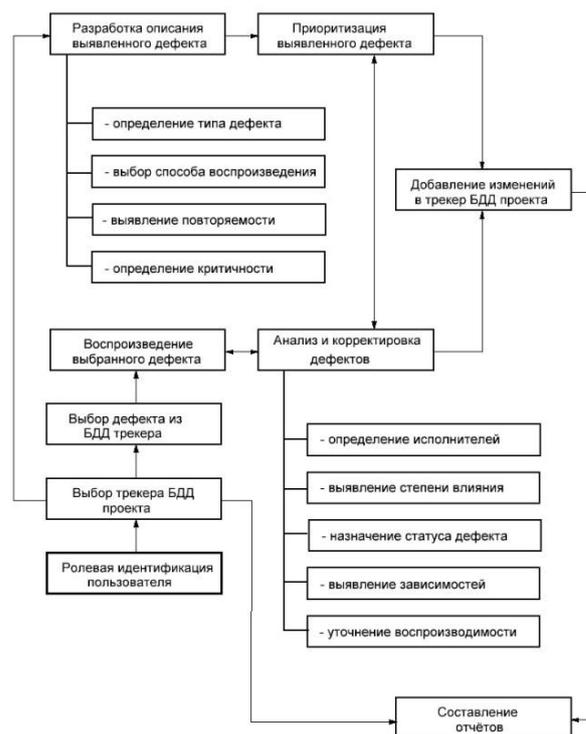


Рис. 2. Функциональная схема обработки единичного дефекта с учётом ситуационной вариативности и многопользовательского доступа к БДД

В таком случае любое изменение на этапе анализа и корректировки будет оказывать прямое воздействие на приоритизацию устранения дефектов. При установке же приоритетов ролью, имеющей расширенные функциональные возможности (по статусу), все изменения будут находиться в рамках назначенных приоритетов. Подобная обработка каждого созданного дефекта позволяет выделить

следующие рычаги управления блока «Анализ и корректировка дефектов»:

- настройки и данные приоритизации устранения дефекта, в частности, и на уровне проекта в целом;

- настройки и политики ролей как ответственных лиц по отношению к созданному инциденту, так и каждого участника проекта в совокупности;

- внутренние и глобальные настройки программной системы, используемой в качестве инструмента управления БДД.

Мультипарадигмальность управления жизненным циклом как программных, так и аппаратных систем может быть представлена средствами как ручного ввода описания выявленных инцидентов (текстовое описание), так и средствами видеофиксирования и создания последовательности воспроизведения посредством группы скриншотов, что позволяет лишь отойти от сложностей восприятия текстового материала и упростить механизм описания сложных ситуаций повтора. Наибольшую эффективность применения мультипарадигмального подхода к разработке предлагает способ выполнения макросов. Такой вариант позволяет в несколько раз увеличить эффективность обработки ситуаций, свидетельствующих о наличии одного или нескольких дефектов. Полученный программистом или специалистом по качеству сценарий может в дальнейшем использоваться в процессах обеспечения и управления качеством, а также отладке и формировании тестовых БД. Создание подобных сценариев способно стать не только основой при формировании регрессионных тестов, но и базисом автоматизированных тестов, а также тест-кейсов для дымового тестирования.

Заключение. Применение мультипарадигмальной методологии при разработке программных и аппаратных комплексов способно повысить как эффективность контроля дефектов, так и качество готового продукта, превосходящее прогнозируемые расчёты. Об этом свидетельствует сокращение временных расходов и трудоёмкости разработки/тестирования за счёт применения информационных средств и специализированных программных инструментов, благодаря которым возможно наращивание потенциала для дымового и регрессионного тестирования, а также поддержка актуальности БДД на заранее заданном уровне.

Прогнозирование обозначенных перспектив от применения мультипарадигмальной методологии позволяет говорить о том, что роль автоматизации в цепи управления ЖЦД довольно велика. Полезный

эффект от внедрения данной методологии порождает ряд причин, по которым необходимо осуществление автоматизации на проектах разработки ПО:

- предотвращение ситуаций ложного обнаружения дефектов;

- использование универсального «языка» описания воспроизводимых дефектов с целью унификации БДД;

- сокращение времени поиска обнаруженных дефектов;

- сокращение трудоёмкости отладки;

- содержание базы дефектов в актуальном состоянии.

Остановившись на обозначенных выше направлениях автоматизации, следует сделать акцент, на формировании единообразия и унификации методов обнаружения/воспроизведения. Результатом применения мультипарадигмальной методологии может стать и создание интеллектуальных баз данных, но главное преимущество её заключается в улучшении уже существующего технологического производства в конкретной организации и разработке программных и аппаратных систем в целом.

Литература

1. Черников, Б.В. Управление качеством программного обеспечения [Текст] / Б.В. Черников. – М. : Форум, 2012. – 240 с.

2. Проекты - Разработка. [Электронный ресурс] : Режим доступа : <http://www.radix-tools.ru/projects>

3. Данилин, А.О. Формализация определения уровня качества программного обеспечения [Текст] / А.О. Данилин, Г.В. Петрухнова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т.10. 11. – № 5-1. – С. 52–56.

4. Данилин, А.О. Обеспечение надёжности программных решений [Текст] / А.О. Данилин, М.Д. Кол, Г.В. Петрухнова // Информатика: проблемы, методология, технологии : мат-лы XV Международной науч.-методич. конф. – Воронеж. – 2015. – Т. 2. – С. 265–268.

5. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 4–13.

6. Акинин, А.А. Сравнительная оценка вычислительных алгоритмов полиномиального преобразования булевых функций [Текст] / А.А. Акинин, С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. Т. 9. - № 1. - С. 31-35.

7. Тюрин, С.В. Способ тестопригодного проектирования логических преобразователей [Текст] / С.В. Тюрин, С. Л. Подвальный, Ю.С. Акинина // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). - 2010. - № 1. - С. 36-41.

Воронежский государственный технический университет

MULTI-PARADIGM CONCEPT LIFECYCLE MANAGEMENT OF DEFECTS OF HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEMS

A.O. Danilin, M.D. Kol, G.V. Petruhnova

Discusses the life cycle of defects in the prospects of modern methodology of incident management software and hardware systems. It is carried out an analysis of the currently existing paradigms of life cycle management of defects. Proposed multi-paradigmatic approach to work with the database of defects

Key words: quality assurance, defect lifecycle, macro-description, a multi-paradigmatic methodology, database defects

ОБОБЩЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ

Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев

В статье описывается постановка задачи оптимизации структуры развивающихся мультисервисных сетей в условиях фиксированной потребности в услугах с применением аппарата динамического программирования

Ключевые слова: мультисервисные сети, динамическое программирование, дискретное программирование

В связи с постоянным ростом разнообразия информационных услуг в настоящее время мультисервисные сети получили широкое распространение.

Поддержание конкурентоспособности и расширение сферы влияния таких сетей, требует реализации оптимальных процедур структурной и компонентной модернизации сети в условиях её развития [1].

В процессе развития системы информационного обслуживания клиентов мультисервисной сети необходимо решить две главные задачи. Первая задача связана с оптимальным размещением включаемых в сеть дополнительных узлов. Вторая задача с выбором оптимального состава включенных в сеть узлов из множества альтернативных устройств и программных продуктов различных производителей [2,3].

Для формального рассмотрения задачи размещения узлов введем следующие обозначения:

$U = \{u_1, \dots, u_I\}$ - множество узлов сети u_i , $i = \overline{1, I}$;

$L = \{l_1, \dots, l_J\}$ - множество альтернативных мест размещения узлов сети l_j , $j = \overline{1, J}$;

p_{ij} - затраты на размещение узла u_i в альтернативном месте l_j ;

v_j - количество пользователей, желающих подключиться к сети в месте l_j , $j = \overline{1, J}$, отражает потребность в услугах сети на конкретной территории [4];

V_{\min} - минимальное количество потенциально подключенных пользователей.

Тогда задача оптимального размещения вводимых в сеть узлов сети сводится к минимизации суммарных затрат на их размещение. Данная задача может быть сведена к задаче линейного целочисленного программирования [5]:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} z_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{узел } u_i \text{ размещается в месте } l_j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Введем следующие ограничения. Число клиентов сети должно превышать минимальный установленный порог подключаемых пользователей, определяемый в соответствии с планом развития сети [4]:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J z_{ij} v_j \geq V_{\min} \quad (3)$$

Узел не может быть размещен в нескольких местах одновременно:

$$\sum_{j=1}^J z_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, I} \quad (4)$$

Перейдем к рассмотрению задачи оптимального выбора комплекса технических средств (КТС). Данная задача требует решения в зависимости от фиксированного спроса и может быть сведена к динамической задаче дискретного программирования [1,6].

Предлагается рассматривать задачу в рамках планируемого временного периода $[0, T]$, который разбивается на K фиксированных временных подынтервалов $[\tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_K]$.

Для формального рассмотрения задачи оптимизации комплекса технических средств введем следующие обозначения:

\tilde{t}_k - подынтервал времени решения задачи оптимального выбора КТС, где $k = \overline{1, K}$;

t_{ki} - подынтервал времени, в рамках которого осуществляется оптимальный выбор КТС для узла u_i , где $i = \overline{1, I}$, $k = \overline{1, K}$;

$B = \{b_1, \dots, b_E\}$ - множество типов оборудования, доступного для установки в узлах;

c_e - стоимость установки типа оборудования b_e , $e = \overline{1, E}$;

Елизаров Дмитрий Эдуардович – ВГТУ, аспирант, e-mail: elizarovdm@list.ru

Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

Воропаев Александр Петрович – ВГТУ, ст. преподаватель, e-mail: vap-vgtu@mail.ru

d_e - стоимость деинсталляции оборудования типа b_e , $e = \overline{1, E}$;

v_e - физическая ёмкость оборудования b_e , $e = \overline{1, E}$, определяет количество пользователей, которое возможно подключить к конкретному типу оборудования;

$S_e(t_{ki})$ - функция затрат на оборудование типа b_e для подынтервала времени t_{ki} , где $i = \overline{1, I}$, $k = \overline{1, K}$;

V_k^{\min} - требуемая минимальная задействованная ёмкость сети для подынтервала времени \tilde{t}_k , $k = \overline{1, K}$;

V_i^{\max} - максимальная ёмкость, реализуемая одним узлом сети (максимальное количество пользователей, которое возможно подключить к одному узлу), определяется пропускной способностью линий связи.

Введем в рассмотрение матрицу Y , которая определяет факт вхождения узла в состав сети для каждого из подынтервалов времени $[\tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_K]$ и является результатом решения задачи о размещении узлов:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \dots & y_{1,K} \\ \dots & y_{ki} & \dots \\ y_{I,1} & \dots & y_{I,K} \end{bmatrix} \quad (5)$$

С использованием введенных обозначений сформулируем данную задачу на детерминированном временном интервале $[0; T]$, как задачу дискретного динамического программирования. В каждый момент времени $\tilde{t}_k \in [0; T]$, $k = \overline{1, K}$, необходимо для каждого размещенного узла определить оптимальный состав оборудования, чтобы затраты на его установку и деинсталляцию были минимальны [1, 7]. Формально данная задача сводится к следующей постановке:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I (y_{ki} \sum_{e=1}^E S_e(t_{ki})) \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{узел } u_i \text{ входит в состав сети на} \\ & \text{подынтервале времени } \tilde{t}_k, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (7)$$

$$S_e(t_{ki}) = \begin{cases} 0, & \text{если } (\overline{x_e(t_{(k-1)i})} \cap \overline{x_e(t_{ki})}) \cup \\ & \cup (\overline{x_e(t_{(k-1)i})} \cap x_e(t_{ki})); \\ c_e, & \text{если } \overline{x_e(t_{(k-1)i})} \cap x_e(t_{ki}); \\ d_e, & \text{если } x_e(t_{(k-1)i}) \cap \overline{x_e(t_{ki})}, \end{cases} \quad (8)$$

$$x_e(t_{ki}) = \begin{cases} 1, & \text{оборудование } b_e \\ & \text{устанавливается;} \\ & \text{на подынтервале } t_{ki} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{e=1}^E x_e(t_{ki}) = 0, \text{ если } y_{ki} = 0, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}. \quad (10)$$

Ограничение (10) в данном случае, гарантирует, что для каждого подынтервала времени \tilde{t}_k , $k = \overline{1, K}$ оборудование возможно установить только в узлы, входящие в состав сети.

Введем следующие ограничения. Для каждого подынтервала \tilde{t}_k , $k = \overline{1, K}$ ёмкость устанавливаемого оборудования должна быть больше или равна требуемой минимальной задействованной ёмкости сети для рассматриваемого интервала:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{e=1}^E v_e x_e(t_{ki}) \geq V_k^{\min}, k = \overline{1, K}. \quad (11)$$

Для каждого узла сети u_i , $i = \overline{1, I}$ суммарная ёмкость устанавливаемого оборудования не должна превышать максимальной ёмкости для одного узла сети, определяемой пропускной способностью магистральных линий связи:

$$\sum_{e=1}^E v_e x_e(t_{ki}) \leq V_{U_{\max}}. \quad (12)$$

Количество оборудования, которое может быть установлено для каждого i -го узла на каждом подынтервале \tilde{t}_k , $k = \overline{1, K}$, не может быть меньше минимального реализуемого количества, необходимого для установки и функционирования узла X_{\min} , и не может превышать максимального количества оборудования, которое возможно включить в состав одного узла X_{\max} [4]:

$$X_{\min} \leq \sum_{e=1}^E x_e(t_{ki}) \leq X_{\max}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}. \quad (13)$$

Реализация данной модели оптимального развития мультисервисных сетей позволяет спланировать данный процесс на долгосрочный период в условиях минимизации затрат на оперативную реорганизацию структуры сетей и модернизацию КТС, что повышает качество принимаемых проектных решений.

Литература

1. Елизаров Д.Э. Оптимизационные модели формирования структуры развивающихся мультисервисных сетей информационного обслуживания

населения [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2015. - Т. 11. - № 1. – С. 20-23.

2. Елизаров Д.Э. Модели проектирования развивающихся мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Перспективные исследования и разработки в области информационных технологий. - 2014. – С. 4.

3. Общие принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений [Текст] / Э. А. Бабкин [и др.]. - Н. Новгород: НГТУ, 2008. - 266 с.

4. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей [Текст] / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз, 2010. - 392 с.

5. Бурковский, В. Л. Анализ развивающихся информационных систем на основе аппарата моделирования и оптимизации [Текст]: монография / В. Л. Бурковский, И. М. Матвиенко, А. В. Бурковский. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2009. - 136с.

6. Спирычин, А.А. Проблематика использования облачных технологий в системах принятия решений [Текст] / А.А. Спирычин, Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Прикладная математика, механика и процессы управления. Пермь: Издательство ПНИПУ, 2014. - С. 150.

7. Беллман, Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных [Текст] / Р. Беллман, Э. Энджел. – М.: Мир, 1974. - 204 с

Воронежский государственный технический университет

GENERALIZED OPTIMIZATION MODEL OF MULTI SERVICE NETWORKS DEVELOPMENT

D.E. Elizarov, V.L. Burkovsky, A.P. Voropayev

This article describes the problem statement of multi service networks structures optimization under development with fixed services needs and a usage of a dynamic programming methods

Key words: multi service networks, dynamic programming, discrete programming

АКТИВНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Е.М. Васильев, Р.А. Говоров

Решается задача построения нейросетевой модели управления объектами в критических режимах их функционирования. На примере решения этой задачи для системы принятия решений в электрической распределительной сети показана возможность построения активных нейросетей на базе принципов многоальтернативности

Ключевые слова: система принятия решений, принципы многоальтернативности, активная нейросеть

1. Введение

Принятие решений в системах управления критическими объектами, нарушение нормального функционирования которых наносит значительный ущерб экономике и обществу, предполагает высокую степень соответствия принимаемого решения текущему состоянию объекта [1-3]. Обеспечение этого соответствия путём создания автоматизированных систем интеллектуального управления предусматривает [4]:

накопление фактических данных об объекте управления и установление на основе этих данных причинно-следственных взаимосвязей его состояния с параметрами внешней среды;

обобщение полученной информации и формирование общей модели управления, позволяющей принимать решения не только в известных, но и в ранее не встречавшихся ситуациях.

непосредственное применение построенной модели для выработки решения по текущему состоянию объекта.

Диалектическая необходимость указанных гносеологических и репродуктивных задач объективно свидетельствует о существовании биологических прототипов, процессы в которых, в соответствии с основной идеей кибернетики [5,6], могут быть использованы для построения формальных систем управления и принятия решений.

Таким прототипом является процесс нервной деятельности живых организмов, в результате которого у животных накапливается набор приобретённых рефлексов, обеспечивающих адекватную реакцию организма на изменяющиеся условия среды обитания. Более того, эволюционный механизм естественного отбора закрепляет наиболее важные генетические изменения в наследуемые формы [7]. Материальные носители этого процесса образуют нервную систему, которая, по современным представлениям [8], может рассматриваться как совокупность нейронов – нейросеть.

Теория искусственных нейронных сетей со времени первой публикации 1943 года [9,10] развивалась по пути всё более детального воспроизведения физиологических особенностей работы отдель-

ных нейронов и их взаимосвязей. Однако успехи в этом направлении следует признать весьма скромными не только в практических приложениях, но и в плане построения общей нейронной модели деятельности мозга именно в силу излишней детализации этой деятельности без осмысления работы нервной системы в целом [11,12].

В предлагаемой работе рассматривается построение нейросетевой модели управления на основе достаточного общих эволюционных принципов организации её функционирования – принципов многоальтернативности, изложенных в работах [13-15]. Обращение к этим принципам основано на том, что сам факт формирования нервной системы у высших организмов является необходимой предпосылкой их эволюционного приспособления к многообразию условий внешней среды, в отличие от простейших животных, среда обитания которых ограничена узкой экологической нишей. Можно заметить, что адаптационная гибкость поведения высших организмов, приобретаемая благодаря наличию нервной системы, является, по существу, следствием непрерывной череды принимаемых ими решений в критических условиях или ситуациях, угрожающих их существованию.

Для предметного сопоставления известного и многоальтернативного подходов к построению искусственных нейросетей в статье используется демонстрационная задача технического содержания, которую можно рассматривать также как частный случай информационной системы [16].

2. Техническое содержание задачи

В качестве демонстрационного примера рассмотрим распределительную электрическую сеть, состоящую из входной высоковольтной подстанции и тридцати трансформаторных подстанций низкого напряжения, рис. 1 [17].

Примем, что кабели передачи электроэнергии, обозначенные штриховыми линиями, являются резервными и подключаются к системе при возникновении критических событий: перегрузках или выходе из строя основных питающих кабелей.

Для данной системы электроснабжения можно поставить задачу разработки нейросетевой модели принятия решений, обеспечивающей, при возникновении критического события, подачу команды на подключение соответствующей резервной линии.

Небольшая размерность поставленной задачи, определяемая числом подстанций $n=30$, позволяет

Васильев Евгений Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: vgtu-aits@yandex.ru
Говоров Роман Александрович – ВГТУ, студент, тел. (473) 243-77-76, e-mail: vgtu-aits@yandex.ru

составить полный перечень критических ситуаций и необходимых управлений и количественно анализировать работоспособность построенных вариантов нейросети при сокращении обучающей выборки, а

также при одновременном возникновении нескольких критических событий. Номера этих событий с указанием номеров подстанций, соединяемых отказавшей линией, представлены в табл.1.

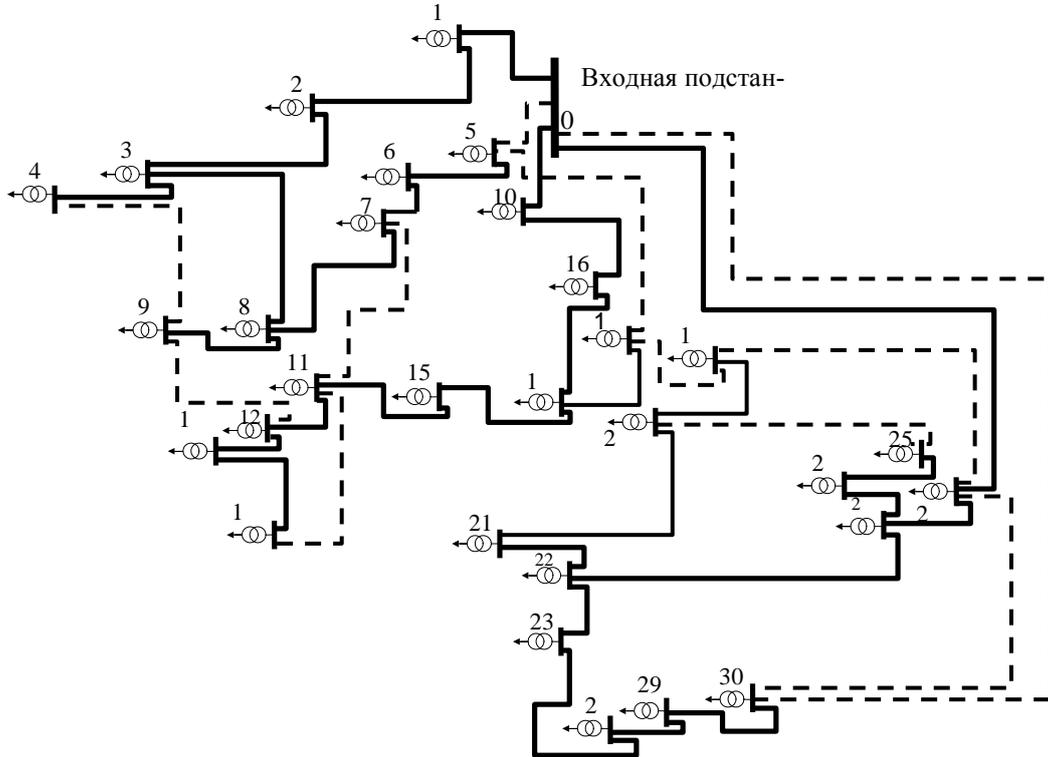


Рис. 1. Конфигурация рассматриваемой электрической сети

Таблица 1

Множество критических событий

Номер события	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Номера подстанций	0-1-1	0-1-2	0-1-3	0-1-3-4	0-1-3-8	0-1-3-8-9	0-1-3-8-7	0-1-3-8-6	0-1-3-8-5	0-1-3-8-26	0-1-3-8-27	0-1-3-8-23	0-1-3-8-28	0-1-3-8-29	0-1-3-8-23	0-1-3-8-22	0-1-3-8-21	0-1-3-8-20	0-1-3-8-19	0-1-3-8-10	0-1-3-8-16	0-1-3-8-18	0-1-3-8-18	0-1-3-8-15	0-1-3-8-11	0-1-3-8-12	0-1-3-8-13	0-1-3-8-27	0-1-3-8-24	

3. Построение пассивной нейросети

В классическом виде нейросеть представляется функционалом [18,19]:

$$y_{j_N}(x) = F \left(\sum_{i_N} b_{i_N j_N} \cdot \dots \cdot F \left(\sum_{i_2 j_2} b_{i_2 j_2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times F \left(\sum_{i_1 j_1} b_{i_1 j_1} x_{i_1 j_1} + c_{j_1} \right) + c_{j_2} \right) + \dots + c_{j_N} \right), \quad (1)$$

в котором b , c – векторы настраиваемых параметров (весовых коэффициентов); r – номер слоя сети; j_r – номер нейрона в слое r ; i_r – номер входа в нейрон; N – количество слоёв сети; x , y – векторы входных и выходных переменных сети; $x_{i_r j_r}$ – элемент i вектора x , подаваемый на нейрон j в слое r ; $F(b, c, x)$ – функция активации нейронов, например, сигмоидального вида:

$$F(b, c, x) = \frac{1}{1 + e^{-bx}} + c. \quad (2)$$

Один слой такой сети без обратных связей (сеть прямого распространения сигналов) показан на рис. 2, содержание которого позволяет отнести сети такого рода к классу пассивных сетей в силу неизменности своей структуры в процессе обучения, заключающемся только в параметрической настройке весовых коэффициентов b и c .

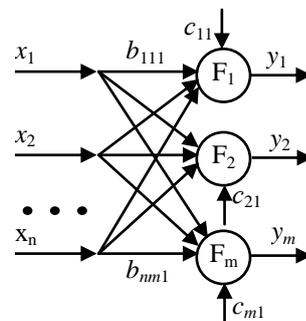


Рис. 2. Слой пассивной нейросети

Для данной задачи была использована двух-слойная сеть с тридцатью входами, десятью нейро-

нами в первом слое и одиннадцатью выходами, т.е. $N=2$, $|x|=n=30$, $|y|=m=11$.

Обучающая выборка представляет собою перечень из $z=30$ критических ситуаций (событий), характеризующихся, как было указано выше, отключением нескольких подстанций из-за перегрузки или выходе из строя основных питающих линий.

Фрагмент обучающей выборки представлен в табл. 2, полное число строк в которой равно количеству возможных критических событий, т.е. числу основных линий, а число столбцов – количеству подстанций. Единица в ячейке ij означает, что при возникновении критического события i подстанция с номером j будет обесточена.

Таблица 2

Фрагмент обучающей выборки в виде матрицы критических событий

№ события	Номера обесточенных подстанций																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
...
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Нумерация резервных линий приведена в табл. 3; перечень принимаемых решений (матрица решающих правил) – в табл. 4

Таблица 3

Нумерация резервных линий

Номер линии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Номера подстанций	4-9	7-11	0-5	5-17	11-14	17-19	19-26	0-30	30-26	9-12	20-25

Обучение нейросети осуществлялось методом обратного распространения ошибки и заключалось в предъявлении тридцати векторов критических ситуаций x и соответствующих решений y , необходимых для восстановления работоспособности сети. Кроме того, в опытах 2...13 (табл.5) с целью оценки обобщающих свойств нейросети обучение проводилось по неполным выборкам, и при проверке для распознавания предъявлялись ситуации, не участвующие при обучении. С этой же целью в сеть, обученную по полному набору одиночных отказов, вводились одновременные отказы двух основных линий (табл. 6).

Таблица 4

Фрагмент матрицы решающих правил

№ события	Номера резервных линий										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
...
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 5

Результаты исследования одиночных отказов

№ опыта	Ситуации, не вошедшие в обучающую выборку	Номера нераспознанных ситуаций при проверке сети
1	Нет	Нет
2	9	9,20
3	8,9	7,8,9,10,24,25,26
4	7,8,9	8,9,11,26
5	5,7,8,9	5,6,7,8,9,10,11
6	3,5,7,8,9	5,6,7,8,9,10,11
7	2,3,5,7,8,9	1,2,3,5,7,8,9,11
8	22	9,11,22,26
9	21,22	20,21,22
10	15	11
11	14,15	10,11,15
12	13,14,15	11,15
13	12,13,14,15	4,12,15,29,30

Таблица 6

Результаты исследования двойных отказов

№ опыта	Номера ситуаций, создаваемых при проверке сети	Номера нераспознанных ситуаций при проверке сети
1	1 и 20	1,20
2	1 и 10	1,10
3	10 и 20	10,20
4	24 и 20	24
5	10 и 11	11

Результаты проверки сведены в табл. 5,6 и свидетельствуют о следующем:

из тринадцати вариантов обученных сетей только одна сеть (опыт 1, табл.5) полностью распознала все предъявленные аварийные ситуации, входящие в обучающую выборку;

большинство сетей не распознаёт события, не входящие в обучающую выборку (табл. 5), т.е. пас-

сивные нейросети демонстрируют отсутствие экстраполирующих свойств и полное несоответствие своей структуры структуре критических событий. В частности, в опыте 2, табл.5 не распознаётся ситуация 9, являющаяся частным случаем шести! ситуаций 1,2,3,5,7,8 (см. рис. 1, табл.1,2), все из которых распознаются сетью. Аналогичные результаты показывают опыты 3...7; 8,9; 11...13, табл. 1. Эти факты свидетельствуют об отсутствии обобщающих способностей у полученных сетей;

при одновременном возникновении двух событий, каждое из которых по отдельности распознаётся сетью, во всех опытах (табл. 6) не было получено ни одного полностью верного решения, что говорит о невысоких интерполирующих и избирательных свойствах сети.

В целом, выявленные на тестовой задаче низкие функциональные возможности построенной нейросети не позволяют использовать её в ответственных задачах управления критическими объектами. Попытки изменить конфигурацию сети, число слоёв и количество нейронов, метод обучения – не приводят к существенному улучшению сети из-за её общей, принципиальной ограниченности: сеть не способна к изменению своей структуры при обучении, т.е. пассивна.

Устранение указанной причины возможно при переходе к концепции проектирования сетей на основе эволюционных принципов многоальтернативности: модульности, многоуровневости и разделения функций [13-15], позволяющих строить так называемые активные нейронные сети.

4. Построение активной нейросети

Отмеченная выше неспособность пассивной нейросети к изменению своей структуры приводит к возникновению у искусственных сетей недостатков, совершенно не свойственных их биологическим прототипам [4,12,20], в частности:

проблема переобучения, заключающаяся в том, что обучение нейросети каждому новому входному событию-образу происходит путём изменения всех параметров b и c сети. При этом неизбежно искажаются результаты предшествующего обучения, в то время как в естественных нейросетях элементы памяти обладают высокой избирательностью (селективностью), и характер запоминания носит накопительный характер, практически неограниченный по объёму;

отсутствие обобщающих свойств, устанавливающих между распознаваемыми ситуациями отношения “частное-общее”, для чего сеть должна обладать развитой многоуровневой, иерархической структурой;

отсутствие блочности строения искусственных нейросетей, приводящее к быстрому росту числа настраиваемых параметров с увеличением размерности задач, т.е. проявлению “проклятия размерности” при обучении. В биологических нейросетях ограничений на вновь запоминаемую информацию, связанных с её объёмом, накопленным ранее, не наблюдается.

Современные представления о нервной системе как о структурной организации нервных клеток [8,12] свидетельствуют о том, что для биологических нейросетей характерны:

независимое хранение событий нервной деятельности в виде ансамбля связанных нейронов, дифференцированно возбуждаемых только от определённых сенсорных сигналов. Такая независимость исключает возникновение переобучения;

организация нейроансамблей одновременно как в иерархическую, так и в сетевую структуру, связывающую их по различным общим признакам (свойствам) входных сигналов-событий;

активность нейросети, обеспечивающая перестройку структуры связей между ансамблями после каждого факта обучения (формирование нового устойчивого ансамбля и встраивание его в общую структуру сети).

Для реализации указанных свойств в искусственной нейросети предлагается отказаться от попыток имитации работы биологической нервной системы на уровне процессов функционирования элементарных нейронов и перейти к воспроизведению информационной структуры хранения и обработки информации [21].

В качестве такой структуры может быть использован фасетный принцип классификации объектов (от фр. *facette* – грань), который характеризуется тем, что для каждого события формируется ансамбль (набор) $\{f,s\}$ признаков-фасетов f , совокупность значений s которых определяет собою конкретный объект $a(f,s)$:

$$a \in A, |A|=z, f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, \quad (3)$$

$$s = \{s^{f_1}, s^{f_2}, \dots, s^{f_n}\}, s^{f_i} = \{s_1^{f_i}, s_2^{f_i}, \dots, s_n^{f_i}\}, i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Фасетный принцип хранения информации позволяет объединять различные объекты в сетевую структуру $A^i = a_1^i \cap a_2^i \cap \dots \cap a_z^i$ отдельно по каждому признаку f_i , при этом введение дополнительного признака или объекта не требует перестройки ранее имеющейся структуры связей, а лишь дополняет её. Существенно, что в сформированном множестве признаков-фасетов f_i возможна некоторая иная, например, иерархическая, классификация объектов.

Для рассматриваемой задачи перечень фасетов $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, $n=30$, образует собою столбцы табл. 2; число объектов-событий $z=30$ – строки этой таблицы; количество значений каждого признака $t=2$: $s^{f_i} = \{0;1\}$.

Графическая иллюстрация фасетной организации фрагмента сети представлена на рис. 3, на котором ансамбли нейронов F выполняют логическую операцию “и”. Нумерация нейронов соответствует номеру события из табл. 1.

Важной особенностью полученной модели является её структурная аналогия модели объекта, т.е. структура модели отображает объектную среду. Например, при выходе из строя основной линии 11-12 будут обесточены подстанции 12,13 и 14, что соответствует событию 26 и приятно реше-

ния о включении резервной линии 10 (см. рис.3). В то же время из рис. 1 следует, что частным случаем возникшей ситуации является обесточенность подстанций 13 и 14. Этому случаю соответствует событие 27 и принятие моделью решения о включении

резервной линии 5. Таким образом, использование модели приведёт к включению двух резервных линий с номерами 10 и 5. Анализ электрической схемы рис. 1 показывает, что при отказе основной линии 11-12 оба этих решения эквивалентны.

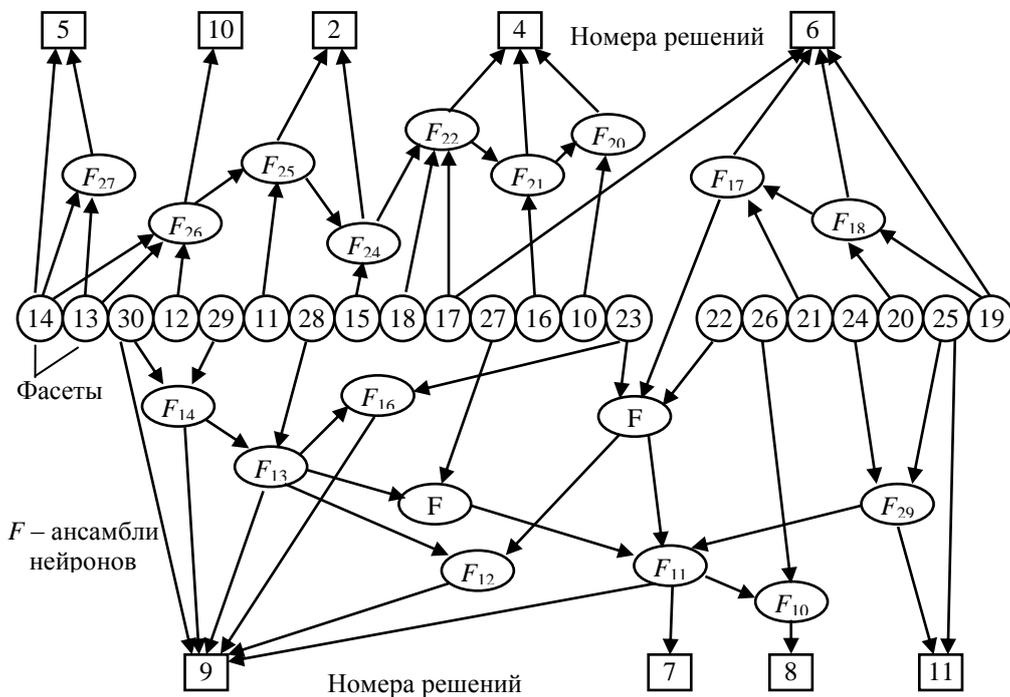


Рис. 3. Фасетная структура активной нейросети

Из этого следует, что построенная модель обладает обобщающими свойствами в той мере, в которой это позволяет структура объекта. Действительно, если при обучении сети будет предъявлена ситуация 20 (F_{20} на рис. 3), то этого окажется достаточно для правильного парирования не рассмотренных при обучении критических ситуаций 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, поскольку все они являются частными случаями общей ситуации 20. Отметим, что появление обобщающих свойств у фасетной нейросети обусловлено наличием в ней иерархических взаимосвязей, т.е. её многоуровневостью.

Процедура обучения в такой нейросети включает в себя:

- добавление нового объекта в виде ансамбля значений признаков $a(f,s)_{z+1}$ (строка $z+1$ в табл. 2);
- включение каждого признака-фасета объекта в сетевую структуру этого признака.

При этом ранее сформированные взаимосвязи в сети не разрушаются, что исключает возможность появления в ней явления переобучения. Поскольку блочный характер обучения сводится к простому наращиванию сведений о новых ситуациях и не требует какой-либо многопараметрической оптимизации, то в сети сохраняются высокие избирательные свойства: для каждой аварийной ситуации вырабатывается одно решение с суперпозицией этих решений при одновременном возникновении нескольких отказов. Например, при одновременном возникновении событий 10 и 11 (опыт 5, табл.6) моделью бу-

дут выработаны решения 7, 8 и 9, полностью восстанавливающие электроснабжение (см. рис.3).

Иллюстрация изменения структуры модели при появлении в обучающей выборке новых событий приведена на рис. 4.

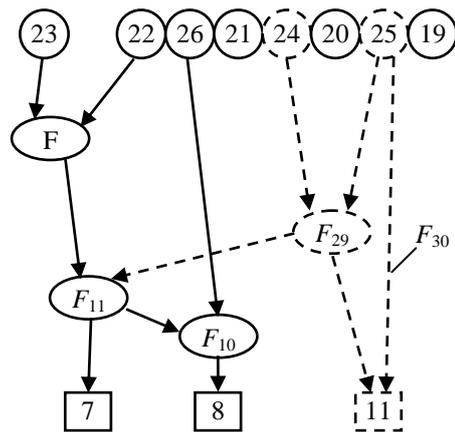


Рис. 4. Перестройка структуры при обучении новым событиями 29 и 30 (отключение подстанций 24, 25)

Рис. 4 иллюстрирует накопительный характер обучения, полностью сохраняющий в нейросистеме сформированные ранее структурные связи.

5. Заключение

Использование пассивных нейросетевых моделей принятия решений в ответственных системах

управления критическими объектами сталкивается со значительными трудностями их практической реализации по причине склонности этих моделей к переобучению и низким интерполирующим и экстраполирующим возможностям.

Проектирование нейронных систем на основе эволюционных принципов многоальтернативности позволяет создавать активные нейромодели с перестраиваемой структурой, по своим свойствам в значительно большей степени приближающиеся к их биологическим прототипам:

иерархическая многоуровневая схема внутренних взаимосвязей в сети обеспечивает высокие обобщающие способности системы при принятии решений в ситуациях, не встречавшихся при обучении;

модульность строения позволяет встраивать в структуру системы новые ансамбли нейронов, не встречая при этом ограничений “проклятия размерности” и эффекта переобучения;

фасетная организация памяти по правилу “одно событие – один ансамбль” обеспечивает возможность неограниченного избирательного наращивания числа событий в системе и практическую реализацию сформулированного У.Эшби информационного принципа необходимого разнообразия [6].

Литература

1. Егоров, Н.В. Диагностические информационно-экспертные системы [Текст] / Н.В. Егоров, А.Г. Карпов. – С.-Пб.: СПбГТУ, 2002. – 472 с.
2. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов [Текст] // Серия 03. Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Выпуск 10. – М.: ГУП НТЦ ПБ Госгортехнадзора России, 2001. – 60 с.
3. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нестандартных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды [Текст] / А.В. Геловани, А.А. Башлыков, В.Б. Бритков и др. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 304 с.
4. Ткалич, С. А. Основания и возможности использования искусственных нейросетей в системах прогнозирования [Текст] / С.А. Ткалич, Е.М. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – № 2. – С. 37-38.
5. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине [Текст] / Н. Винер. – М.: Наука, 1983. – 344 с.
6. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику [Текст] / У.Р. Эшби. – М.: УРСС, 2006. – 432 с.

7. Анохин, П.К. Системные механизмы высшей нервной деятельности [Текст] / П.К. Анохин. – М.: Наука, 1979. – 453 с.

8. Карпенков, С.Х. Концепции современного естествознания [Текст] / С.Х. Карпенков. – М.: Академический Проект, 2003. – 640 с.

9. McCulloch, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity [Text] / W.McCulloch, W.Pitts // The Bulletin of Mathematical Biophysics.– 1943.– № 5.– P.115-133.

10. Мак-Каллок, У.С. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности [Текст] / У.С. Мак-Каллок, У.Питтс // Нейронные сети: история развития теории. – М.: Радиотехника, 2001. – С. 5-22.

11. Редько, В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: модели и концепции эволюционной кибернетики [Текст] / В.Г. Редько. – М.: Либроком, 2013. – 224 с.

12. Шамис, А.Л. Пути моделирования мышления [Текст] / А.Л. Шамис. – М.: Комкнига, 2006. – 336 с.

13. Подвальный, С.Л. Эволюционные принципы формирования структуры вычислительных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Адаптация в сложных системах управления: сб. науч. тр. Воронеж: Воронежский политехнический институт, 1979. – С. 60–63.

14. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 4–13.

15. Подвальный, С.Л. Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы [Текст] / С.Л.Подвальный, Е.М.Васильев // Управление большими системами.– 2014.– №48.– С. 6–58.

16. Kravets, O.Ja. Multivariate time series analysis with significant factors delayed influence consideration based on discrete processes dynamics neural network simulation [Text] / O.Ja. Kravets, I.N. Kryuchkova // Control Systems and Information Technology. – 2014. – Vol. 3. – No. 1. – P. 12-19.

17. Васильев, Е.М. Синтез электрических сетей с оптимальной конфигурацией [Текст] / Е.М. Васильев, И.В. Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 16-20.

18. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс [Текст] / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

19. Васильев, Е.М. Метаэвристический алгоритм обучения нейронных сетей [Текст] / Е.М. Васильев, В.В. Меренков // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – № 3. – С. 56-59.

20. Мануковская, М.М. Активные нейросетевые модели принятия решений [Текст] / М.М. Мануковская, Е.М. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2008. – № 4. – С. 76-78.

21. Мугатина, В.М. Нейро-информационные структуры в системах принятия решений [Текст] / В.М. Мугатина, Е.М. Васильев // Современные методы прикладной математики и компьютерных технологий: Сб. науч. тр. VII Международной конференции ПМТУКТ-2014. – Воронеж: Научная книга, 2014. – С. 265-268.

Воронежский государственный технический университет

ACTIVE NEURAL NETWORK CONTROL MODEL OF CRITICAL OBJECTS

E.M. Vasiljev, R.A. Govorov

The problem of building a neural network control model of objects in critical modes of operation. For example, the solution of this problem for a system of decision-making in the electricity distribution network is a possibility of building a active neural network on the basis of principles multialternative

Key words: decision-making system, the principles multialternative, active neural network

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КООРДИНАТОРА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТРАНЗАКЦИЙ В УСЛОВИЯХ WEB-СЕРВИСА

С.А. Рыков, Ахмед Али М. Ахмед, М.В. Локшин

В статье рассматривается проблематика управления транзакциями в гетерогенных распределенных информационных средах и предлагается средство построения координатора транзакций на базе скриптового языка Lua в условиях Web-сервиса

Ключевые слова: Lua, РСУБД, СУБД, ИС, web-сервис

Введение

С течением времени приоритеты деятельности организаций изменяются: реорганизируются, приобретают другие направления, расширяют возможности некоторых приложений, к примеру средствами построения новых web-сервисов. При таких изменениях организации сталкиваются с проблематикой эффективного и экономически-выгодного обеспечения ресурсов для формирования их в соответствие с приоритетами. Требуется нахождение решения, обеспечивающего доступ к информационной структуре тогда и в том месте, где возникает необходимость, реализуя и оптимизируя доступ к информации независимо от ее физической структуры. Требуется интеграция информации во всей распределенной среде, будь то в пределах одного сервера или в гетерогенной распределенной информационной среде, для нескольких независимых систем или некоторой комбинации решений.

Обеспечение доступа к информационной структуре

Для решения данной проблематики рассматриваем процесс объединения всех СУБД в единую сервисную базу данных, в то время как фактическое местоположение рассматриваемых СУБД остается неизменным. При построении данной структуры информация остается в ее первоначальном источнике, где она и модифицируется. Большинство источников данных представляют единую интегрированную виртуальную базу данных, маскируя количество и различия видов СУБД.

Объединенное решение для сервисных СУБД позволяет получить прямой доступ к данным не только известных представителей БД, таких как Linter, Paradox, Clipper, MS SQL Server, MUMPS, Oracle, но и к СУБД, более современных, производителей, без определения фактического физического местоположения данных от web-сервиса. Поскольку нет необходимости дублировать какую-либо информацию в сервисную web-СУБД, данное объединение обеспечивает самый оперативный путь к интеграции информации. Объединение также формирует зону поддержки такой информации, которая существует в унаследованных web-приложениях или приложениях, требующих наличия локального владельца, и просто не может быть консолидирована. При использовании такого подхода объединения гетерогенной распределенной СУБД возникают два понятия: локальные транзакции и глобальные транзакции.

Разделение транзакций общего типа на локальные и глобальные выступило в связи с применением распределенных многозвенных систем. Локальными транзакциями при рассогласованности с сервисными СУБД, называются транзакции, управление которыми реализуется средствами баз данных. С точки зрения программной поддержки, использующей универсальный API, для доступа к базе данных локальные транзакции формируются и завершаются в привязке к определенному соединению к СУБД. Как правило, открытое управление локальными транзакциями реализуется за счет вызова методов, таких как «сохранить транзакцию в БД» или «откатить транзакцию из БД». Такой режим работы характерен для создания приложений в архитектуре «клиент—сервер». Если процедура завершения транзакции реализуется в рамках одной команды, значит

Рыков Сергей Александрович – ВГТУ, канд. техн. наук, ст. преподаватель, e-mail: rykov@vorstu.ru

Ахмед Али Мухамед Ахмед – ВГТУ, аспирант, e-mail: p.ali80@yahoo.com

Локшин Марк Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: lokshin_mark@mail.ru

СУБД использует однофазный режим завершения таких транзакций. При такой реализации нет возможности создавать транзакцию, которая бы «объединяла» действия, используя несколько соединений одновременно.

В архитектуре «клиент—сервер» реализация процедуры использования однофазных локальных транзакций возможна до тех пор, пока не используются распределенные СУБД. В момент создания данной архитектуры в коде клиентского приложения устанавливается соединение с СУБД, явно или неявно создается функция, начинающая локальную транзакцию. Затем производится выборка данных, и как следствие, завершение транзакции. Если она была последней и все необходимые действия уже выполнены, производится разрыв соединения с СУБД.

Если же используется распределенная СУБД, что определяет реализацию процедуры изменения данных в нескольких СУБД в контексте одной транзакции, — то для решения этой задачи должна обеспечиваться возможность формирования единой транзакции, выполняемой для нескольких баз данных этого типа. Такая процедура реализации условно называется «локальными транзакциями с двухфазным завершением».

Реализация координатора транзакций

Увеличение требований к технологиям построения сложных проектов, возрастанию их уровня надежности и масштабируемости, а также возможности создания гетерогенных РСУБД, привели к изменению ситуации следующим образом: появились готовые комплексные технологии построения распределенных систем реального времени. Наиболее известными и совершенными из них являются такие как CORBA, J2EE и .NET. Ранее для РСУБД определение транзакции было распространено на ИС в целом, являющейся незначительной частью такой системы. Транзакционной стал не только информационный контент в долговременных хранилищах — такими стали конечные объекты, из которых строится вся информационная система. Вследствие разработки такой системы возникла задача индивидуальной работы на уровне представленных распределенных объектных транзакций и транзакций на уровне гетерогенных баз данных. Для реализации управления такими объектными транзакциями

в многозвенных информационных системах существует специальная компонента, которую обычно называют координатором транзакций.

В разработанной информационной системе координатор транзакций реализован на базе скриптового языка программирования Lua, который позволяет решить задачу транзакционной модели с двухфазным завершением. Выбор данного языка программирования был сделан по причине его легкости в использовании, простого синтаксиса, и при этом достаточной мощи: язык поддерживает объекты, мета-таблицы делают его тип безусловно гибким, а использование API-функций допускает отличную интеграцию, увеличение сценариев и расширение возможностей базового языка. Lua может использоваться в комплексе с приложениями типа «клиент-сервер», написанные на различных языках программирования высокого уровня, в том числе поддержка web языков, таких как PHP, Perl, Python, Ruby, ASP.NET, Groovy. Рассматриваемый язык координатора транзакций прост в обучении, благодаря возможности расширения с помощью C-функций, может применяться для решения обширного круга задач, используя механизмы объектно-ориентированного программирования с поддержкой прототипов.

Этапы настройки информационной системы

При определении библиотеки координатора транзакций LTM, построенного в условиях LUA машины, с применением модернизированного скриптового языка LQL происходит несколько действий для настройки системы на работу, последовательность действий которых представлена ниже.

1. Загрузка основного файла конфигурации. В директории с исполнимым программным обеспечением, происходит поиск файла с именем conf/ORB.conf. Затем специальными средствами системы его значения считываются в буфер настроек.

2. Инициализация ORB-пространства. На данном этапе формируется загрузка стека необходимых библиотек omniORB 4.3. Далее, используя загруженные настройки вызывается инициализационный метод omniORB, который в свою очередь подготавливает среду CORBA для взаимодействия с общей информационной системой web-приложения.

3. Инициализация LUA-машины. В связи с необходимостью использования

интерпретатора языка LUA, возникает необходимость загрузки в память основных концепций, что реализуется методами обращения к функции `lua_open()` из стека библиотек Lua. Данная операция формирует новое состояние и возвращает указатель. В случае, если возникает ситуация дефицита памяти – в результате работы будет определен нулевой указатель.

4. Загрузка необходимых библиотек. Рассматривая п.3, в котором был реализован процесс создания нового независимого состояния LUA, для которого производится загрузка стандартных дополнительных библиотек, таких как функции для работы со строками, математикой, дополнительные функции отладки, функции для работы с операционной системой, построенных на скриптовом языке LUA, либо на другом ЯВУ совместимого с общим загрузчиком представленного интерпретатора.

5. Создание контейнера алиасов. На данном этапе производится процедура создания объекта специального класса, который разработан специально и содержит полный набор алиасов к СУБД, занимается их созданием, удалением и поиском в системе. Объект рассматриваемого контейнера регистрирует уникальных метод в LUA-машине. Вызов представленной инструкции необходим для добавления ссылок к распределенным базам данных рассматриваемой информационной системы в контейнер.

6. Регистрация внешних инструкций в LUA-машине. Рассматривая данный шаг индивидуально, по причине необходимости регистрации ранее подготовленных операций для интерпретатора. Именно после данного шага происходит процедура модернизации стандартного LUA языка в язык LQL.

7. Загрузка файла алиасов. Файл алиасов представлен в виде списка описателей на удаленные СУБД. В результате выполнения которого в интерпретаторе, объект контейнера ссылок будет содержать набор объектов алиасов, при использовании которых формируется обращение к требуемым компонентам общей информационной системы. Если рассмотреть диаграмму классов для объекта алиаса – определяем, что базовым классом для него является `LQLObject`, который реализует функционал по фиксации внешних и дополнительных инструкции в интерпретаторе LUA. Далее, используя родительские методы, объект класса `LQLAlias` формирует

собственную глобальную мета-таблицу данных с уникальным идентификатором (именем), содержащую в себе инструкции виртуальной машины для доступа к распределенной СУБД. Мета-таблица представляет собой обычную таблицу в LUA, в которой представлены допустимые операции над значением.

Одним из глобальных классов, отвечающих за работу информационной системы в рамках поставленной задачи, является класс `Alias`, который обеспечивает взаимодействие со средой следующим образом: он инкапсулирует в себя объектные ссылки на CORBA скелетона `HSystem.DriverManager` и `HSystem.Connection`. Используя CORBA ссылки на объекты рассматриваемых классов происходит выполнение транзакции на языке SQL к СУБД с которой в текущий момент установлено прямое соединение. Данный механизм реализован в рамках операции `Alias::query()`, который делегируется средствами класса `LQLAlias` с целью дальнейшей регистрации в интерпретаторе LUA. После окончания рассматриваемого процесса уникальная ссылка на объект становится доступной в языке формирования запросов.

8. Создание среды выполнения транзакций. Построенная среда выполнения транзакций предназначена для хранения состояний выполнения каждой локальной транзакции в условиях распределенного запроса к СУБД, которая в момент выполнения распределенного запроса к информационной системе реального времени отслеживает работу каждой операции в интерпретаторе. Как только в условиях поиска встречается инструкция выполнения локального запроса к РСУБД, среда выполнения помещает завершенный объект локальной транзакции в свой контейнер. При наличии ошибок в момент выполнения распределенного запроса - откатывает все транзакции находящиеся в контейнере. В случае отсутствия ошибочных ситуаций - фиксирует каждую транзакцию в своей базе данных, с целью последующего выполнения.

9. В случае успешной реализации каждого ранее рассмотренного этапа (п.1-п.8) производится формирование глобального объекта класса `LQLGlobal`, который является внутренним классом глобальной среды LQL. Используя динамическое преобразование к интерфейсу `ILQLGlobal`, возвращает указатель на зафиксированный объект web-приложению. Если на этапе инициализации ORB, инициализации LUA машины произошла

ошибка, то построенная информационная модель генерирует исключение, в котором определены правила говорящие о том, что с этого момента работа библиотеки невозможна, соответственно web-приложение определяет нулевой указатель.

Заключение

Таким образом, скриптовый язык LUA, в условиях построения координатора транзакций LTM, с применением модифицированного языка запросов LQL обладает достаточными удобствами, имеющимися в современных языках программирования сценариев: выполнения математических операций, управляющие структуры, итераторы и стандартные библиотеки для обработки строчных объектов, выдачи и сбора данных. Все это абсолютно удовлетворяет требованиям

при создании рассматриваемой информационной системы.

Литература

1. Бурковский, В.Л. Моделирование и алгоритмизация управления гетерогенными базами данных в распределенных информационных системах [Текст] / В.Л. Бурковский, А.Н. Дорофеев, С.В. Семьин // Воронеж, ВГТУ, 2003 г. – с 71.
2. Рыков, С.А. Управление гетерогенными распределенными объектами информационных систем реального времени [Текст] / С.А. Рыков, В.Л. Бурковский, А.А. Голиков // Воронеж: ВГТУ, 2012 г. – с 193
3. Рыков, С.А. Математическое и программное обеспечение информационных систем реального времени с гетерогенной средой распределенных СУБД [Текст] / С.А. Рыков // Воронеж: ВГТУ, 2011 г. – с 185
4. Локшин, М.В. Методика получения временных оценок исполнения запросов в параллельных СУБД с репликацией данных [Текст] / М.В. Локшин // Системы управления и информационные технологии. - 2014. -№ 4. – С. 41-44

Воронежский государственный технический университет

TECHNOLOGY OF CONSTRUCTION OF THE DISTRIBUTED TRANSACTION COORDINATOR IN THE WEB- SERVICE

S.A. Rykov, Ahmed Ali M. Ahmed, M.V. Lokshin

The article deals with the problems of transaction management in heterogeneous distributed IT environments and offers a means of building transaction coordinator based scripting language Lua in a Web-service

Key words: Programming language Lua, Database Management System (DBMS), RDBMS, CORBA, IS, web-service

О СУБТАНГЕНЦИАЛЬНОМ ПОДХОДЕ К АНАЛИЗУ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНКУРЕНТНОГО РАВНОВЕСИЯ

Ю.Я. Агранович, В.Л. Хацкевич, А.С. Чернова

Метод минимизации подкасательной применяется к траектории, описывающей во времени отношение конкурирующих характеристик одной динамической модели

Ключевые слова: динамическая модель, субтангенциальный метод

Введение

Рассматривается среда с конечным числом конкурирующих процессов и естественным набором законов сохранения. При этом «конкурирование» связано с некоторым отношением предпочтения, которое определяется заданным конусом. В рассматриваемом нами случае этим конусом является положительный октант декартовой системы координат. Предполагается также, что скорости процессов в среде линейно зависят от разности конкурирующих факторов. Для моделирования процессов в таких средах удобно использовать математические модели рыночного равновесия.

Постановка задачи

В данной работе мы рассматриваем модель Эрроу-Дебрэ в качестве определяющих соотношений и закон сохранения в форме закона Вальраса. Так, например, для рынка из n различных товаров, на котором имеется m участников рынка, обозначим цену i -го товара через p_i . Они образуют вектор цен $\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$. Пусть в начальный момент k -й участник рынка обладает набором товаров $\vec{y}^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_n^k)$, а желает иметь $\vec{x}^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$. Модель Эрроу-Дебрэ конкурентного рынка основывается на следующих предположениях:

1) Предполагается, что рынок закрытого типа. Так что стоимость набора товаров у всякого участника рынка в любой момент времени сохраняется, то есть

$$(\vec{p}, \vec{x}^k) = (\vec{p}, \vec{y}^k) \quad (k=1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

где скобки (\cdot) обозначают скалярное произведение в евклидовом пространстве R^n .

2) Считается, что k -й участник рынка при выборе желаемого набора товаров исходит из

соображений, связанных с максимизацией своей функции полезности $u^k(\vec{x})$. Она достигает максимума в точке \vec{x}^k при выполнении бюджетного ограничения (1) и условия $\vec{x}^k \geq 0$ (это неравенство понимается по координатам).

Схема исследования и основные результаты

Определим вектор избыточного спроса

$$\vec{z} = \sum_{k=1}^m \vec{x}^k - \sum_{k=1}^m \vec{y}^k. \quad (2)$$

Согласно (1) выполнен закон Вальраса

$$(\vec{z}, \vec{p}) = 0. \quad (3)$$

Следуя [1], будем предполагать, что скорость изменения рыночных цен пропорциональна избыточному спросу. Изменяя масштаб, можно считать, что выполнено соотношение

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{z}(\vec{p}). \quad (4)$$

В силу закона Вальраса (3) для любого решения $\vec{p}(t)$ уравнения (4) имеем $\sum_{i=1}^n p_i \frac{dp_i}{dt} = 0$.

Следовательно,

$$\sum_{i=1}^n p_i^2(t) = \sum_{i=1}^n p_i^2(0) \quad (\forall t > 0). \quad (5)$$

Система (4) – это динамическая модель конкурентного рынка. Предполагая, что не все цены в начальный момент равны нулю, из (5) получаем, что рассматриваемая динамическая модель определяет некоторую траекторию на сфере в n -мерном пространстве. Исследованию такой модели посвящено значительное число работ. При этом основное внимание уделялось установлению условий устойчивости равновесных состояний системы (4) (устойчивости рынка) при различных предположениях на функцию избыточного спроса $\vec{z}(\vec{p})$ (см. [2]).

Одно из основных предположений состоит в том, что вектор-функция \vec{z} положительно однородна нулевой степени, то есть

$$\vec{z}(c\vec{p}) = \vec{z}(\vec{p}) \quad (\forall c > 0). \quad (6)$$

Это условие означает, что спрос зависит только от соотношения цен, но не от их абсолютных значений. Другие условия типа «валовой замещимости» в нашем исследовании не используются.

Агранович Юрий Яковлевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, тел. (473) 267-04-52, e-mail: agurya19591212@yandex.ru

Хацкевич Владимир Львович – ВГУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: vlkhats@mail.ru

Чернова Александра Сергеевна – ОАО «Сбербанк России», ст. специалист, тел. 8(920)440-79-97, e-mail: alexsandra151@yandex.ru

В настоящей работе рассмотрен вопрос, в какой момент времени соотношение цен в соответствии с моделью (4) изменяется наиболее быстро. Для решения такого типа задач естественно использовать субтангенциальный метод [6].

Далее мы рассматриваем рынок, состоящий из двух товаров, и будем опираться на представленное в [3] изложение результатов из [4].

Согласно (6) функция избыточного спроса \bar{z} зависит только от соотношения цен, поэтому введем новую переменную по формуле

$$r = \frac{p_2}{p_1}. \quad (7)$$

Тогда, в частности, вторая координата вектора \bar{z} есть некоторая функция от r , т.е. $\bar{z}_2(\bar{p}) = f(r)$. При этом на основании закона Вальраса (3) получим $z_1(\bar{p}) = -rf(r)$. Следовательно, в силу (7) справедливо

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{1}{p_1^2} \left(p_1 \frac{dp_2}{dt} - p_2 \frac{dp_1}{dt} \right) = \\ &= \frac{1}{p_1} (f(r) + r^2 f'(r)). \end{aligned} \quad (8)$$

Кроме того, на основании (5) $p_1^2(t) + p_2^2(t) = p_1^2(0) + p_2^2(0) := c$. Таким образом, траектория динамической системы это дуга окружности, квадрат радиуса которой равен c . Величина $r(t)$ является тангенсом угла наклона радиуса-вектора точки на указанной дуге к оси абсцисс. Соотношения (7) и (8) определяют следующую задачу Коши:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{c} (1 + r^2)^{3/2} f(r), \quad r(0) = \frac{p_2(0)}{p_1(0)} = r_0. \quad (9)$$

Рассмотрим график решения задачи (9) в координатах (t, r) . Обозначим правую часть уравнения (9) через $g(r)$. Зафиксируем точку t и предположим, что касательная к графику траектории (9) в заданной точке t пересекает ось времени в момент времени t_1 . Тогда уравнение касательной имеет вид

$$t_1 - t = \frac{r(t)}{r'(t)} = \frac{r}{g(r)}. \quad (10)$$

Таким образом, интересующий нас вопрос сводится к минимизации правой части (10) по r , а затем к отысканию искомого момента времени t .

При этом, если r_* - точка минимума, то искомым момент времени t_* отыскивается по формуле

$$t_* = c \int_{r_0}^{r_*} \frac{dr}{(1 + r^2)^{3/2} f(r)},$$

вытекающей из (9).

Поясним указанную схему на конкретном примере, рассмотренном в [4] для иллюстрации устойчивости рынка. Как и выше будем считать, что на рынке имеется два товара. Предположим, что

каждый участник рынка имеет логарифмическую функцию полезности вида

$$u^k(x_1, x_2) = \alpha_k \ln x_1 + (1 - \alpha_k) \ln x_2, \quad (11)$$

где $\alpha_k \in (0, 1)$. Отметим, что в этом случае кривая безразличия задается уравнением $x_1^{\alpha_k} \cdot x_2^{1-\alpha_k} = c$.

Будем считать, что k -й участник рынка выбирает набор товаров $\bar{x}^k = (x_1^k, x_2^k)$, максимизирующий (11) при ограничениях $x_1 \geq 0$, $x_2 \geq 0$ и

$$p_1 x_1 + p_2 x_2 = p_1 y_1^k + p_2 y_2^k := M^k, \quad (12)$$

где $\bar{y}^k = (y_1^k, y_2^k)$ - его начальный вклад.

Подставим в (11) вместо x_2 величину $(M^k - p_1 x_1) / p_2$, выраженную из (12). Находя максимум соответствующей функции одной переменной, получим функцию спроса для k -того участника рынка

$$\bar{x}^k(\bar{p}) = \left(\frac{\alpha_k}{p_1} M^k, \frac{(1 - \alpha_k)}{p_2} M^k \right).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \bar{x}^k(\bar{p}) - \bar{y}^k &= \\ &= \left(\frac{p_2}{p_1} \alpha_k y_2^k - (1 - \alpha_k) y_1^k, \frac{p_2}{p_1} (1 - \alpha_k) y_1^k - \alpha_k y_2^k \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Положим $r = p_2 / p_1$ и

$$A = \sum_{k=1}^n \alpha_k y_2^k > 0, \quad B = \sum_{k=1}^n (1 - \alpha_k) y_1^k > 0.$$

Тогда согласно (2), (13) функция обобщенного спроса в данном случае имеет вид

$$\bar{z}(\bar{p}) = \left(Ar - B, \frac{B}{r} - A \right).$$

Таким образом, функция $f(r)$, выражающая ранее связь $z_2(\bar{p}) = f(r)$, в нашем примере задается формулой $f(r) = \frac{B}{r} - A$. Тогда уравнение (9) принимает вид

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{c} (1 + r^2)^{3/2} \left(\frac{B}{r} - A \right). \quad (14)$$

Исследуем поведение траекторий уравнения (14). Обратим внимание, что $r_0 = \frac{B}{A}$ - стационарное решение уравнения (14), соответствующее равновесному состоянию рынка.

Если начальное условие $0 < r(0) < \frac{B}{A}$, то правая часть (14) в начальный момент положительна. Тогда $\left. \frac{dr}{dt} \right|_{t=0} > 0$ и решение $r(t)$ в начальный момент возрастает. Более того, возрастает оно при всех $t > 0$, поскольку принять значение r_0 оно не может в силу единственности решения задачи Коши.

Если же в начальный момент $r_0 > \frac{B}{A}$, то аналогично предыдущему $\frac{dr}{dt} < 0$ при всех $t > 0$.

Рассмотрим для определенности случай $0 < r(0) < \frac{B}{A}$. Так как $\frac{dr}{dt}$ - тангенс угла наклона касательной, а в случае $\frac{dr}{dt} > 0$ угол острый, то

$$\frac{1}{c}(t-t_1) = \frac{r}{(1+r^2)^{3/2} \left(\frac{B}{r} - A\right)} > 0. \quad (15)$$

В силу (10) отыскание момента времени t , минимизирующего длину подкасательной $t-t_1$, сводится к отысканию минимума выражения по r , стоящего в правой части последнего уравнения.

Производная дроби, стоящей в правой части (15), равна

$$\frac{2r^3 - \frac{B}{A}r^2 - r + 2\frac{B}{A}}{(1+r^2)^3 \left(\frac{B}{r} - A\right)^2}. \quad (16)$$

Приравнявая производную к нулю, получим кубическое уравнение относительно r вида

$$2r^3 - \frac{B}{A}r^2 - r + 2\frac{B}{A} = 0. \quad (17)$$

Таким образом, точка минимума определяется отношением $\frac{B}{A}$.

Нас интересует положительный корень уравнения (17), гарантирующий точку минимума. Заметим, что согласно теореме Виета этот случай не реализуется при наличии одного вещественного и двух комплексно сопряженных корней уравнения (17), так как в этом случае вещественный корень отрицателен. Кроме того, он не реализуется и в случае кратных вещественных корней. Действительно, по теореме Виета возможен только случай кратного положительного корня. При этом еще один корень - отрицательный. А при переходе через кратный корень знак выражения (16) не меняется. Таким образом, необходимым условием существования решения нашей задачи является вещественность и однократность всех корней уравнения (17), иными словами, дискриминант этого кубического уравнения должен быть отрицательным.

Напомним, что уравнение $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$ заменой $x = y - \frac{b}{3a}$ приводится к виду $y^3 + 3py + 2q = 0$ [5], где

$$3p = -\frac{3ac - b^2}{3a^2}, \quad 2q = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a}.$$

При этом дискриминант $D = q^2 + p^3$.

В случае уравнения (17), полагая $v = \frac{B}{A}$, получим

$$q = \frac{v}{24} \left(11 - \frac{v^2}{9}\right), \quad p = -\frac{1}{36} (6 + v^2). \quad (18)$$

Тогда условие $D < 0$ принимает вид $z \left(11 - \frac{z}{9}\right)^2 - \frac{1}{9^2} (6 + z)^3 < 0$, где $z = v^2$. Преобразуя это неравенство, получим $8z^2 - 259z + 8 \geq 0$. Корни соответствующего уравнения имеют вид $z_{\pm} = \frac{259 \pm 45\sqrt{33}}{16}$. Следовательно,

$$\left(\frac{B}{A}\right)^2 \in (0, z_-) \cup (z_+, +\infty) \text{ или } \frac{B}{A} \in (0, \sqrt{z_-}) \cup (\sqrt{z_+}, +\infty). \quad (19)$$

Отметим, что приближенно $z_+ \approx 32,36$; $z_- \approx 0,03$.

Итак, в случае выполнения (19) имеется три различных вещественных корня $r_1 < r_2 < r_3$ уравнения (17). Согласно теореме Виета $r_1 < 0$ и $0 < r_2 < r_3$. В силу представления

$2r^3 - \frac{B}{A}r^2 - r + 2\frac{B}{A} = 2(r-r_1)(r-r_2)(r-r_3)$ нетрудно видеть, что при переходе через корень r_2 данное выражение меняет знак с «+» на «-». Следовательно, r_2 - точка максимума. При переходе через точку r_3 знак меняется с «-» на «+». Следовательно, r_3 - точка минимума, т.е. искомый корень.

Если начальное условие $r(0) > \frac{B}{A}$, то $\frac{dr}{dt} < 0$ ($\forall t > 0$) и решение уравнения (14) монотонно убывает, оставаясь больше $\frac{B}{A}$. В этом случае $t_1 > t$ и для определения минимума подкасательной имеет место равенство

$$\frac{1}{c}(t_1 - t) = -\frac{r}{(1+r^2)^{3/2} \left(\frac{B}{r} - A\right)} > 0. \quad (20)$$

Тогда отыскивая производную правой части, приходим к выражению $-2r^3 + \frac{B}{A}r^2 + r - 2\frac{B}{A}$, стоящему в числителе (в знаменателе положительное число). Поэтому в случае $D < 0$ корни будут те же самые $r_1 < r_2 < r_3$. Однако минимум достигается в точке r_2 .

Пусть r_* - решение уравнения (17), дающее минимум функции (15) или (20). Тогда необходимый момент времени t_* определяется формулой

$$t_* = c \int_{r_0}^{r_*} \frac{dr}{(1+r^2)^{3/2} \left(\frac{B}{r} - A\right)}, \quad (21)$$

вытекающей из (14).

Выпишем формулы для корней с помощью вспомогательных величин [5]. Положим

$\rho = \pm\sqrt{|p|} = \pm\frac{1}{6}\sqrt{6+v^2}$, где знак ρ совпадает со знаком q .

Пусть $\cos \varphi = \frac{q}{\rho^3}$. Заметим, что при

выполнении (18) соотношение $\left|\frac{q}{\rho^3}\right| \leq 1$ обеспечено

предположением $D < 0$. В наших условиях

$\cos \varphi = \frac{q}{\rho^3} = \frac{v(99-v^2)}{(6+v^2)^{3/2}}$. Тогда, поскольку $p < 0$ и

$D < 0$, то

$$r_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{B}{A} - 2\rho \cos \varphi/3,$$

$$r_2 = \frac{1}{6} \cdot \frac{B}{A} + 2\rho \cos\left(\frac{\pi}{3} - \varphi/3\right),$$

$$r_3 = \frac{1}{6} \cdot \frac{B}{A} + 2\rho \cos\left(\frac{\pi}{3} + \varphi/3\right).$$

При этом знак ρ , совпадающий со знаком q в соответствии с (18), (19), определяется так: $\rho > 0$,

если $\frac{B}{A} \in (0, \sqrt{z_-}) \cup (\sqrt{z_+}, 3\sqrt{11})$ и $\rho < 0$, если

$\frac{B}{A} \in (3\sqrt{11}, +\infty)$.

Как известно, темпом роста дифференцируемой функции $r(t)$ в момент t называют значение логарифмической производной функции в этой точке, а именно, $(\ln r(t))' = \frac{r'(t)}{r(t)}$.

Таким образом, в силу (10) мы установили, что в точке t_* , определяемой формулой (21), наблюдается наибольший темп роста отношения цен нашей модели рынка.

Заключение

Близкие по тематике задачи исследованы в работах [6], [7]. Так в [6] обсуждается субтангенциальный подход в модели Самуэльсона-Хикса. В [7] методами функционального анализа исследованы вопросы существования положительных решений модели Эрроу-Дебрэ с многозначной функцией избыточного спроса, а также устойчивость рыночного равновесия. Субтангенциальный метод может быть также

использован при изучении двумерной модели Рамсея-Солоу. Необходимый вспомогательный материал для этого имеется в [8].

Отметим, что в целом субтангенциальный метод позволяет получать количественные результаты, конкретизирующие абстрактные методы функционального анализа и теории полупорядоченных банаховых пространств. Более того, при определенных обстоятельствах (см.[6]), субтангенциальный метод приводит к появлению арифметической прогрессии, позволяющей применить метод многоугольных чисел (см.[9]) для построения сглаживающего фильтра, соответствующего рассматриваемой системе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект №14-01-00253-а.

Литература

1. Самуэльсон, П. Основания экономического анализа [Текст]: пер с англ. / П. Самуэльсон. - СПб.: Экономическая школа, 2002. - 604 с.
2. Никайдо, Х. Выпуклые структуры и математическая экономика [Текст]: пер с англ. / Х. Никайдо. - М.: Мир, 1972. - 544 с.
3. Кемини, Дж. Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения [Текст]: пер с англ. / Дж Кемини, Дж Снелл. - М.: Советское радио, 1972. - 192 с.
4. Arrow, K.J. On the Stability of the Competitive Equilibrium I. [Text] / K.J. Arrow, L. Hurwitz // *Econometrica*. - 1958. - Vol. 26 - P. 522-552.
5. Агранович, Ю.Я. Краткий конспект лекций по дисциплине «Вычислительная математика» [Текст] / Ю.Я. Агранович, Е.В. Ефанова, М.Л. Лапшина. - Воронеж: ВГТУ, 2005. - 106 с.
6. Агранович Ю.Я. Субтангенциальный анализ модели Самуэльсона-Хикса [Текст] / Ю.Я. Агранович, Н.В. Концевая // *Системы управления и информационные технологии*. - 2014. - Т. 57. - № 3.1. - С. 195-196.
7. Хацкевич В.Л. Об устойчивости конкурентного рыночного равновесия [Текст] / В.Л. Хацкевич // *Экономика и математические методы*. - 2005. - Т. 41. - № 4. - С. 103-107.
8. Хацкевич В.Л. Об устойчивости модифицированной модели Рамсея-Солоу, учитывающей запаздывание при вводе фондов [Текст] / В.Л. Хацкевич // *Экономика и математические методы*. - 2010. - Т. 46. - № 4. - С. 137-143.
9. Yu. Ya. Agranovich, N. V. Kontsevaya, S. L. Podvalny, V. L. Khatskevich, A synthesis of statistical and deterministic methods in problem of smoothing for time series [Текст] / *Automation and Remote Control*, May 2014, Volume 75, Issue 5, pp 971-976.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский государственный университет
ОАО «Сбербанк России», г. Воронеж

ABOUT SUBTANGENTIAL METHOD FOR ANALYSIS AT THE DYNAMIC MODEL OF A COMPETITIVE EQUILIBRIUM

Yu.Ya. Agranovich, V.L. Khatskevich, A.S. Chernova

The method of subtangential minimizing is applied to the trajectory describing the time-the ratio of the contention characteristics of a dynamic model

Key words: competitive equilibrium, dynamic models, subtangential method

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКЦИОННОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ

В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.Н. Донских

В статье рассмотрен подход к разработке программного обеспечения для решения задачи распознавания и классификации сигналов на основе экспертной системы с продукционной базой знаний. В качестве примера рассмотрены возможные этапы построения программного обеспечения для классификации радиолокационных сигналов

Ключевые слова: классификация сигналов, радиолокационные сигналы, продукционная база знаний, искусственная нейронная сеть, CLIPS

Введение

Задача классификации сигналов является актуальной во многих областях науки и техники. Так, например, в средствах и комплексах радиотехнической разведки излучений бортовых средств радиолокации необходимо решить задачу распознавания и классификации типов излучающих радиолокационных станций (РЛС) и режимов их работы. В условиях быстро изменяющейся фоно-целевой обстановки процесс распознавания сигналов бортовых РЛС должен выполняться автоматически и при этом обеспечивать обнаружение заданных сигналов с требуемой вероятностью.

Целью данной работы является разработка структуры программного обеспечения для решения задачи автоматического распознавания и классификации сигналов и рассмотрение возможности ее апробации на примере построения приложения для классификации радиолокационных сигналов.

Структура и этапы работы программного обеспечения

В данной работе для решения задачи распознавания и классификации сигналов предлагается использовать экспертную систему (ЭС) с продукционной базой знаний. Для этого необходимо описать классы сигналов и адекватно отразить их характерные признаки (зависящие от предметной области) в базе знаний ЭС.

В рамках продукционной модели знания представляются правилами вида:

Правило 1:

Если (условие 1)
То (действие 1)

Правило 2:

Если (условие 2)
То (действие 2)

...

Под «условием» понимается некоторый факт, по которому осуществляется поиск в базе знаний, а под «действием» — действия, выполняемые при успешном исходе поиска (на этом этапе могут формироваться условия для дальнейшего поиска, либо работа системы может завершаться) [11].

Каждый факт — это набор данных, сохраняемый в текущем списке фактов — рабочей памяти системы. Обычно факты используются для того, чтобы внести в систему заранее известные знания или добавить информацию, полученную в процессе диалога с пользователем или в результате вычислений. На основе фактов в рабочей памяти системы запускается машина вывода (алгоритм, управляющий перебором правил из базы знаний).

Машина вывода выполняет две основные функции:

- просмотр существующих фактов из рабочей памяти и правил из базы знаний и добавление в рабочую память новых фактов;

- определение порядка просмотра и применения правил. Данная процедура сводится к определению направления поиска (обычно вывод на такой базе знаний бывает прямой (от данных к поиску цели) или обратный (от цели для ее подтверждения — к данным)) и способа его осуществления.

Действие машины вывода основано на применении правила, называемого *modus ponens* (если известно, что истинно утверждение А и существует правило вида «ЕСЛИ А, ТО В», тогда утверждение В также истинно). Правила срабатывают, когда в рабочей памяти находятся факты, удовлетворяющие их левой части: если истинна посылка, то должно быть истинно и заключение.

Для создания экспертной системы может быть использована программная среда для разработки экспертных систем CLIPS. В CLIPS используется прямой логический вывод (обратный вывод не поддерживается). Реализация вывода использует алгоритм Rete [10].

Для добавления новых правил в базу в системе CLIPS используется конструктор *defrule*, синтаксическая схема которого может быть представлена следующим образом:

```
(defrule <имя_правила>
```

Барабанов Владимир Федорович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvf@list.ru

Гребенникова Наталия Ивановна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 243-77-18

Донских Дмитрий Николаевич – ВГТУ, студент, e-mail: dndonskih@gmail.com

<предпосылки > ; левая часть правила
 => ; спец. символ
 <следствие> ; правая часть правила
)

В системе CLIPS новые факты помещаются в рабочую память командой assert. Например, следующая команда (assert (signal_type impulse)) добавит в рабочую память факт signal_type impulse.

Этапы работы программного обеспечения для классификации сигналов в рамках предлагаемого подхода можно представить следующим образом:

1. Предварительная обработка сигнала.

На данном этапе применяются алгоритмы, позволяющие повысить информативность сигнала на основании априорно известной информации о его природе;

2. Формирование фактов.

На этом этапе производится выделение характерных признаков сигнала. Предполагается, что пользователь задает ряд алгоритмов (выбор конкретных алгоритмов зависит от специфики предметной области), формирующих факты, описывающие характерные признаки сигнала.

3. Логический вывод.

На данном этапе на основе полученных фактов, ранее сформированных правил вывода и заданной стратегии поиска производится классификация сигнала.

Структурная схема программного обеспечения для классификации сигналов представлена на рис. 1.

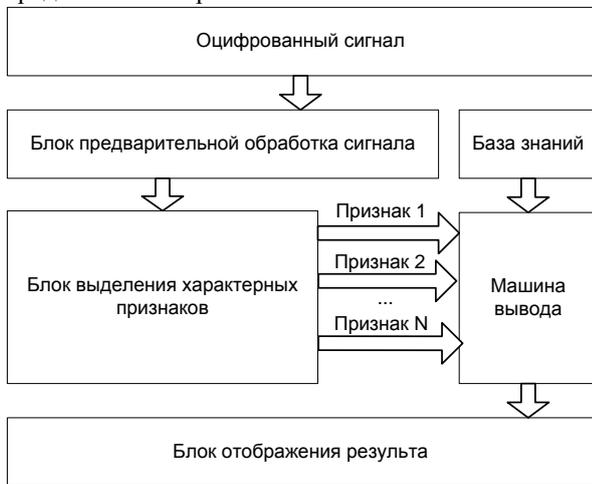


Рис. 1. Структурная схема программного обеспечения для классификации сигналов

Возможный вариант построения приложения для классификации РЛС сигналов

Предлагаемый подход может быть использован для классификации временных рядов различной природы. В качестве примера рассмотрим его использование для построения классификатора радиолокационных сигналов. В данной работе рассматривается случай, когда соотношение сигнал/шум велико.

Рассмотрим основные виды сигналов, используемых в радиолокационных станциях, и

выделим информативные признаки, на основании которых можно произвести их классификацию.

Все радиолокационные зондирующие сигналы, используемые в РЛС, можно разделить на непрерывные и импульсные [6]. Непрерывные зондирующие сигналы делятся на сигналы без модуляции, сигналы с частотной модуляцией и сигналы с фазово-кодовой модуляцией (ФКМ).

Импульсные зондирующие сигналы могут быть одиночными или в виде последовательности радиоимпульсов. Например, в современных импульсно-доплеровских радиолокационных системах используются когерентные последовательности радиоимпульсов с различными частотами повторения. Сквозность последовательности импульсов меняется от 2 (для сигналов с высокой частотой повторения импульсов (ВЧПИ)) до 15...20 (для сигналов со средней частотой повторения импульсов (СЧПИ)) и более нескольких сотен (для сигналов с низкой частотой повторения импульсов (НЧПИ)). Также широко используется периодическое изменение частоты повторения импульсов (вобуляция частоты повторения) [7].

В качестве импульсных зондирующих сигналов могут быть использованы простые радиоимпульсы без внутриимпульсной модуляции (колебания, модулированные только по амплитуде) и радиоимпульсы с внутриимпульсной модуляцией.

Основными сигналами с внутриимпульсной модуляцией, применяемыми в РЛС, являются линейно частотно модулированные (ЛЧМ) и ФКМ-радиоимпульсы (наибольшее распространение получили ФКМ-сигналы, составленные на основе двоичных кодов Баркера и M-последовательности).

Конкретный вид используемого сигнала определяется требованиями к качеству решения задач радиолокации и соответственно требованиям к характеристикам РЛС.

Таким образом, в качестве информативных признаков для классификации сигналов РЛС выделим следующие:

- тип зондирующего сигнала (импульсный или непрерывный);
- частота повторения импульсов;
- наличие/отсутствие вобуляции частоты повторения импульсов;
- наличие/отсутствие внутриимпульсной модуляции и ее вид.

Возможная последовательность действий при классификации РЛС-сигналов с использованием предложенного подхода:

1) Предварительная обработка сигнала.

На этом этапе может осуществляться перенос частоты, фильтрация сигнала от шумов расчет дискретного преобразования Фурье, для получения частотного представления сигнала и прочее.

2) Формирование фактов, представляющих характерные признаки сигнала.

На данном этапе необходимо сформировать ряд фактов, описывающих сигнал РЛС для их

дальнейшего использования машиной вывода экспертной системы.

Если соотношение сигнал/шум велико, то из временного представления сигнала с помощью применения достаточно простых алгоритмов можно получить следующие факты:

- факт, описывающий является ли сигнал импульсным или непрерывным;
- факт, описывающий оценку частоты повторения импульсов;
- факт, описывающий наличие/отсутствие вобуляции частоты повторения импульсов.

Для формирования факта, описывающего тип внутриимпульсной модуляции, можно использовать предварительно обученную искусственную нейронную сеть.

В ряде работ описано использование различных видов искусственных нейронных сетей (таких как многослойный перцептрон [2, 8, 9], самоорганизующаяся нейронная сеть Кохонена [1, 4], нейронная сеть Хопфилда [3]) для распознавания и классификации сигналов.

В работе [1] рассматриваются методы предварительной обработки сигнала для выделения его уникальных признаков (спектральный анализ, растривание спектра, кепстральные коэффициенты). Для распознавания сигналов предложено подавать выделенные признаки на вход самоорганизующейся нейронной сети Кохонена. Также рассматривается возможность использования полученного классификатора в схеме нечеткого блока принятия решений.

В работах [2, 5] в качестве признаков для классификации видов модуляции радиосигналов (FSK-2, PAM, PSK-2, PSK-4, PSK-8, QAM-16) используются кумулянты 2-го и 4-го порядков, вычисляемые по значениям отсчетов сигнала. В качестве устройства классификации в [2] используется многослойный перцептрон.

В работе [3] для распознавания акустических сигналов информативные признаки формируются следующим образом: частотное представление сигнала разбивается на полосы частот, и затем рассчитывается средняя энергия сигнала в каждой из полос частот. Для распознавания сигнала используется комбинация сети Хопфилда и многослойного перцептрона.

Практическим путем было установлено, что для решения задачи классификации типа внутриимпульсной модуляции можно использовать искусственную нейронную сеть прямого распространения, а в качестве входных данных - нормированные оценки отсчетов частотного спектра сигналов, которые соответствуют его локальным максимумам. Для их получения полоса частот, на которой находится сигнал, разделяется на равные отрезки, и по каждому отрезку находится максимум частотного спектра сигнала. Затем, значения полученных отсчетов нормируются (диапазон их изменения ограничивается

интервалом от 0 до 1) и подаются на вход искусственной нейронной сети.

Примеры полученных оценок отсчетов спектра для различных видов РЛС-сигналов представлены на рис. 2-5.

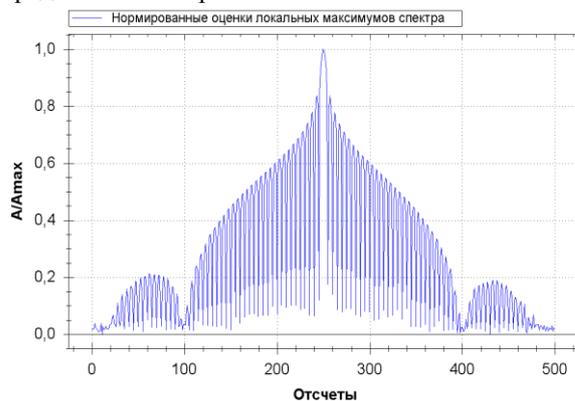


Рис. 2. Оценки отсчетов спектра РЛС сигнала (простые радиоимпульсы с ВЧПИ)



Рис. 3. Оценки отсчетов спектра РЛС сигнала (простые радиоимпульсы с НЧПИ)

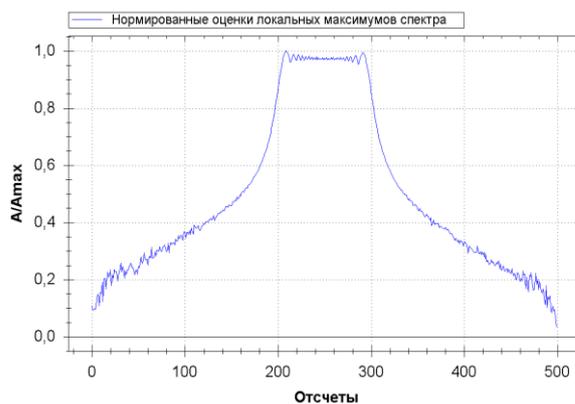


Рис. 4. Оценки отсчетов спектра РЛС сигнала (ЛЧМ модуляция с СЧПИ)



Рис. 5. Оценки отсчетов спектра РЛС сигнала (ФКМ модуляция, М-последовательность (длина последовательности $N = 63$), НЧПИ)

3) Логический вывод.

На этом этапе, на основе заранее сформированных правил вывода, полученных фактов и заданной стратегии поиска, машина вывода экспертной системы относит сигнал к тому или иному классу. Результат классификации (и его промежуточные этапы, если это необходимо) выводится пользователю с помощью блока отображения результата.

Заключение

Таким образом, в данной работе рассмотрен возможный подход к построению программного обеспечения для классификации сигналов с использованием продукционной базы знаний на основе CLIPS. Основным его преимуществом можно назвать то, что пользователь имеет возможность задавать различные алгоритмы обработки сигналов (формирующие факты, описывающие сигнал) и правила вывода, а также наглядность процесса логического вывода. Данный подход может быть использован для построения классификаторов временных рядов различной природы. Недостатком данного подхода можно назвать невозможность его использования в условиях жестких требований к работе в реальном времени [10].

Литература

1. Кладов, С.А. Распознавание голосовых команд с помощью самоорганизующейся нейронной сети Кохонена [Текст]: электронный журнал [Электронный ресурс] / С.А Кладов // Молодежный научно-технический вестник. – 2012 – № 5. – World Wide Web. URL : [http : // www. www. sntbul. bmstu. ru / doc / 458173.html](http://www.sntbul.bmstu.ru/doc/458173.html)
2. Аджемов, С.С. Нейросетевой метод распознавания видов модуляции радиосигналов с использованием кумулянтов высокого порядка [Текст] / С.С. Аджемов, М.В. Терешонок, Д.С. Чиров // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. – 2012 – № 9. – С. 9-12.

3. Деглина, Ю.Б. Нейросетевой алгоритм распознавания сигналов акустической эмиссии [Текст] / Ю.Б. Деглина // Искусственный интеллект. – 2006 – № 4. – С. 95-98.

4. Терешонок, М.В. Классификация и распознавание сигналов систем радиосвязи при помощи самоорганизующихся карт Кохонена с различными топологиями выходного слоя и алгоритмами обучения [Текст] / М.В. Терешонок // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. – 2008 – № 6. – С. 28-31.

5. Семкин, П.В. Методы классификации случайных сигналов в системах контроля радиочастотного спектра [Текст] / П.В. Семкин, А.В. Кузовников, В.Г. Сомов, Н.А. Тестоедов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013 – № 6. – С. 183-187.

6. Радиолокационные системы : учебник [Текст] / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин и др.; под общ. ред. В. П. Бердышева. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 400 с.

7. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т.1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов [Текст] / А.И. Канащенков, В.И. Меркулов, А.А. Герасимов и др.; под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. – М.: «Радиотехника», 2006. – 656 с.

8. Барабанов, В.Ф. Программно-аппаратный комплекс для автоматизации процесса классификации разногабаритных компонентов [Текст] / В.Ф. Барабанов, М.С. Резуев, Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 4. – С. 93-97.

9. Барабанов, В.Ф. Разработка структуры программно-аппаратного комплекса для процесса классификации сыпучего материала [Текст] / В.Ф. Барабанов, М.С. Резуев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2013. - № 2. - С. 149-153.

10. CLIPS – FAQ [Электронный ресурс]: Режим доступа : World Wide Web. URL : [http : // www. www. clipsrules. sourceforge. net / FAQ.html](http://www. www. clipsrules. sourceforge. net / FAQ.html)

11. Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб : Питер, 2000. – 384 с.

12. Подвальный, С. Л. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 5.1. - С. 41-43.

13. Barabanov, A.V. Structural modeling of continuous multi-center polymerization processes [Text] / A.V. Barabanov, S.L. Podval'nyi // Automation and Remote Control. - 2012. T. 73. - № 7. С. 1265-1268.

Воронежский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE FOR CLASSIFICATION SIGNALS WITH USE OF THE PRODUCTIONAL KNOWLEDGE BASE

V. F. Barabanov, N. I. Grebennikova, D. N. Donskih

The article describes an approach to developing software for solving the problem of recognition and classification of signals based expert system with productional rules knowledge base. As an example possible stages of creation of the software for classification of radar signals are considered

Key words: classification of signals, radar signals, productional knowledge base, artificial neural network, CLIPS

УПРАВЛЯЕМОСТЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ТИПА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ГРАФЕ

С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов

Для дифференциальной системы, состояние которой описывается параболической начально-краевой задачей с распределенными параметрами на графе, рассматривается задача распределенного управления в классе слабых решений. При этом управление и наблюдение одновременно являются распределенными на графе, получены условия существования единственного управления, соотношения, характеризующие оптимальное управление, показана управляемость дифференциальной системы

Ключевые слова: дифференциальная система с распределенными параметрами на графе, слабые решения, граничные управление и наблюдение

1. Введение. Настоящая работа продолжает исследования, результаты которых приведены в [1, 2], где основополагающим явился спектральный подход, использующий анализ спектральных характеристик соответствующих краевых задач [3, 4]. Ниже представлен другой подход, основанный на априорных оценках обобщенных решений начально-краевой задачи для уравнений параболического типа с распределенными параметрами на графе [5, 6]. Для задачи оптимального управления параболической системой получены условия существования единственного управляющего воздействия, распределенного на графе. Все рассуждения используют произвольный связный ограниченный ориентированный граф, допускающий наличие циклов, при этом сохраняются обозначения, принятые в [5, 7].

2. Основные понятия и предложения. Обозначим через $\partial\Gamma$ множество граничных, через $J(\Gamma)$ --- множество внутренних узлов графа Γ и пусть Γ_0 --- объединение всех ребер, не содержащих концевых точек, $\partial\mathcal{R}$ --- множество всех граничных ребер (ребер, содержащих граничные узлы $\xi \in \partial\Gamma$); $\Gamma_T = \Gamma_0 \times (0, T)$ ($\Gamma_t = \Gamma_0 \times (0, t)$), $\partial\Gamma_T = \partial\Gamma \times (0, T)$. Каждое ребро γ графа Γ параметризуется отрезком $[0, 1]$ и параметром $x \in [0, 1]$, ориентация ребер установлена в [7, стр. 67].

Введем необходимые пространства: $L_2(\Gamma)$ --- пространство функций, суммируемых с квадратом на Γ (аналогично определяется пространство $L_2(\Gamma_T)$); $W_2^1(\Gamma)$ --- пространство функций из $L_2(\Gamma)$, имеющих обобщенную производную 1-го порядка также из $L_2(\Gamma)$, норма в $W_2^1(\Gamma)$ определяется скалярным произведением

$$(u, v)_{W_2^1(\Gamma)} = \int_{\Gamma} \left(u(x)v(x) + \frac{du(x)}{dx} \frac{dv(x)}{dx} \right) dx;$$

$L_{2,1}(\Gamma_T)$ --- пространство функций из $L_1(\Gamma_T)$ с нормой $PfP_{L_{2,1}(\Gamma_T)} = \int_0^T \left(\int_{\Gamma} f^2(x, t) dx \right)^{1/2} dt$; $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ --- пространство функций $f(x, t) \in L_2(\Gamma_T)$, имеющих обобщенную производную 1-го порядка по x , принадлежащую $L_2(\Gamma_T)$, норма в $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ определяется соотношением

$$PfP_{W_2^{1,0}(\Gamma_T)}^2 = \int_{\Gamma_T} \left(f(x, t)^2 + \frac{\partial u(x, t)^2}{\partial x} \right) dx dt.$$

Пусть далее $V_2(\Gamma_T)$ --- множество всех функций $u(x, t) \in W_2^{1,0}(\Gamma_T)$, имеющих конечную норму

$$PuP_{2, \Gamma_T} \equiv \max_{0 \leq t \leq T} \|u(x, t)\|_{L_2(\Gamma)} + \left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_{L_2(\Gamma_T)} \quad (1)$$

и непрерывных по t в норме $L_2(\Gamma)$, т. е. таких, что $\|u(x, t + \Delta t) - u(x, t)\|_{L_2(\Gamma)} \rightarrow 0$ при $\Delta t \rightarrow 0$ равномерно на $[0, T]$.

Рассмотрим билинейную форму

$$\ell(\mu, \nu) = \int_{\Gamma} \left(a(x) \frac{d\mu(x)}{dx} \frac{d\nu(x)}{dx} + b(x) \mu(x) \nu(x) \right) dx,$$

коэффициенты $a(x)$, $b(x)$ --- фиксированные измеримые ограниченные на Γ_0 функции, суммируемые с квадратом: $0 < a_* \leq a(x) \leq a^*$, $b_* \leq b(x) \leq b^*$, $x \in \Gamma_0$ (a_* , a^* , b_* , b^* --- фиксированные постоянные). Из леммы 2 [7, стр. 72] следует, что в пространстве $W_2^1(\Gamma)$ есть множество Ω функций $u(x) \in C(\Gamma)$ ($C(\Gamma)$ --- пространство непрерывных на Γ функций), удовлетворяющие соотношениям

$$\begin{aligned} & \sum_{\gamma_j \in R(\xi)} a(1)_{\gamma_j} \frac{du(1)_{\gamma_j}}{dx} = \\ & = \sum_{\gamma_j \in r(\xi)} a(0)_{\gamma_j} \frac{du(0)_{\gamma_j}}{dx} \end{aligned}$$

во всех узлах $\xi \in J(\Gamma)$ (здесь $R(\xi)$ --- множество ребер, ориентированных <<к узлу ξ >>, $r(\xi)$ --- множество ребер ориентированных <<от узла ξ >>). Замыкание в норме $W_2^1(\Gamma)$ множества функций из Ω , равных нулю во всех узлах $\xi \in \partial\Gamma$, обозначим через $W_{2,0}^1(a, \Gamma)$. Пусть далее $\Omega_0(a, \Gamma_T)$ --- множество функций $u(x, t) \in V_2(\Gamma_T)$, чьи следы определены на сечениях области Γ_T плоскостью $t = t_0$ ($t_0 \in [0, T]$) как функции класса $W_{2,0}^1(a, \Gamma)$, т.е. для каждого элемента $u \in \Omega_0(a, \Gamma_T)$ при фиксированном $t \in [0, T]$ существует последовательность $\{u_n\}$ функций $u_n(x, t) \in \Omega$, сходящаяся в норме $W_2^1(\Gamma)$ к следу v , при этом $u_n(x, t)$ равны нулю во всех узлах $\xi \in \partial\Gamma$, непрерывны на Γ и удовлетворяют соотношениям

$$\begin{aligned} & \sum_{\gamma_j \in R(\xi)} a(1)_{\gamma_j} \frac{\partial u(1, t)_{\gamma_j}}{\partial x} = \\ & = \sum_{\gamma_j \in r(\xi)} a(0)_{\gamma_j} \frac{\partial u(0, t)_{\gamma_j}}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

для всех узлов $\xi \in J(\Gamma)$. Замыкание множества $\Omega_0(a, \Gamma_T)$ по норме (1), обозначим через $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$: $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T) \subset W_2^{1,0}(\Gamma_T)$. Другим подпространством пространства $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ является пространство $W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$, являющееся замыканием в норме $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ множества гладких функций, удовлетворяющих соотношениям (2) для всех узлов $\xi \in J(\Gamma)$ и для любого $t \in [0, T]$, а также равных нулю вблизи $\partial\Gamma \times [0, T]$. Отличим элементов пространства $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ от элементов $W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ является отсутствие у последних непрерывности по переменной t , соотношение (2) имеет место почти всюду на $(0, T)$. По мере необходимости будут введены другие пространства и их подпространства с интересующими нас свойствами.

Обозначения этого раздела дополним следующими: сужение функции $f(x, t)$ на ребро γ будем обозначать через $f(x, t)_\gamma$; интеграл от функции $f(x, t)$ по области Γ_T понимается как сумма интегралов по областям $\gamma \times (0, T)$ и имеет место представление

$$\int_{\Gamma_T} f(x, t) dx dt = \sum_{\gamma \in \gamma \times (0, T)} \int_{\gamma} f(x, t)_{\gamma_k} dx dt;$$

на протяжении всего раздела рассматриваются измеримые функции и используется интеграл Лебега.

Приведем два простых утверждения, связывающие пространства $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, $L_2(\Gamma_T) \in$ и $L_{2,1}(\Gamma_T)$.

Лемма 1. *Пространство $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$ плотно в $L_2(\Gamma_T)$.*

Доказательство вытекает из самого определения пространства $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$.

Лемма 2. *Имеет место включение $L_2(\Gamma_T) \subset L_{2,1}(\Gamma_T)$.*

Доказательство. Пусть f является элементом пространства $L_{2,1}(\Gamma_T)$. Оценим норму $PfP_{L_{2,1}(\Gamma_T)}$, используя неравенство Коши-Буняковского:

$$\begin{aligned} PfP_{L_{2,1}(\Gamma_T)} &= \int_0^T \left(\int_{\Gamma} f^2(x, t) dx \right)^{1/2} dt \leq \\ & \sqrt{T} \sqrt{\int_0^T \int_{\Gamma} f^2(x, t) dx dt} = \sqrt{T} PfP_{L_2(\Gamma_T)}. \end{aligned}$$

Из полученного неравенства $PfP_{L_{2,1}(\Gamma_T)} \leq \sqrt{T} PfP_{L_2(\Gamma_T)}$ вытекает утверждение леммы.

Таким образом, имеют место включения $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T) \subset L_2(\Gamma_T) \subset L_{2,1}(\Gamma_T)$, по аналогии с [7, стр. 75] можно показать, что пространство $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$ плотно в $L_2(\Gamma_T)$.

Далее рассматривается эволюционная задача с распределенными параметрами на графе и ей соответствующие задачи оптимального управления в пространствах $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ и $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$. При этом в качестве пространства управлений U используется $L_2(\Gamma_T)$.

3. Задача оптимального управления параболической системой в пространстве $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$. Рассмотрим начально-краевую задачу

отыскания решения $y(x, t)$ в области $\bar{\Gamma}_T$, удовлетворяющего условиям (2) во всех внутренних узлах графа Γ :

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right) +$$

$$+ b(x)y(x, t) = f(x, t),$$

$$y|_{t=0} = \varphi(x), \quad x \in \Gamma, \quad (4)$$

$$y|_{\partial\Gamma} = 0, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (5)$$

Предположения относительно функций $a(x)$, $b(x)$ остаются теми же, что и в разделе 1; $f(x, t) \in L_{2,1}(\Gamma_T)$, $\varphi(x) \in L_2(\Gamma)$.

Определение 1. Обобщенным решением класса $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ краевой задачи (3)--(5) называется функция $y(x,t) \in V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$, удовлетворяющая интегральному тождеству

$$\int_{\Gamma} y(x,t)\eta(x,t)dx + \int_{\Gamma_t} \left(-y(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} \right) dxdt + \ell_t(y(x,t), \eta(x,t)) = \int_{\Gamma} \varphi(x)\eta(x,0)dx + \int_{\Gamma_t} f(x,t)\eta(x,t)dxdt \quad (6)$$

для любых $t \in [0, T]$ и при любой $\eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$; $\ell_t(y, \eta)$ --- билинейная форма, определенная соотношением $\ell_t(\mu(x,t), \nu(x,t)) =$

$$= \int_{\Gamma_t} \left(a(x) \frac{\partial \mu(x,t)}{\partial x} \frac{\partial \nu(x,t)}{\partial x} + b(x)\mu(x,t)\nu(x,t) \right) dxdt.$$

Теорема 1 [5]. Задача (3)--(5) однозначно разрешима в пространстве $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$, обобщенное решение непрерывно зависит от исходных данных $f(x,t)$, $\varphi(x)$.

Задача оптимального управления. Пусть $B: U \rightarrow L_2(\Gamma_T)$ --- линейный непрерывный оператор (в силу леммы 2 $Bv \in L_{2,1}(\Gamma_T), \forall v \in U$) и пусть f и φ --- заданные элементы пространств $L_{2,1}(\Gamma_T)$ и $L_2(\Gamma)$, соответственно; $y(v)(x,t) \in V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ (состояние системы) --- обобщенное решение задачи (3)--(5) с правой частью в уравнении (3), равной $f + Bv$ ($v(x,t) \in U$). Соотношение (6) трансформируется к виду:

$$\int_{\Gamma} y(x,t)\eta(x,t)dx + \int_{\Gamma_t} \left(-y(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} \right) dxdt + \ell_t(y(x,t), \eta(x,t)) = \int_{\Gamma} \varphi(x)\eta(x,0)dx + \int_{\Gamma_t} f(x,t)\eta(x,t)dxdt + \int_{\Gamma_t} Bv(x,t)\eta(x,t)dxdt \quad (7)$$

для любых $t \in [0, T]$ и при любой $\eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$.

Пусть $C: V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T) \rightarrow L_2(\Gamma_T)$ --- линейный непрерывный оператор (оператор наблюдения); $N: U \rightarrow U$ --- линейный непрерывный эрмитов оператор, $(Nv, v)_U \geq \zeta P v P_U$ ($\zeta > 0$ --- фиксированная постоянная); $J(v)$ --- функционал, требующий минимизации на выпуклом замкнутом множестве $U_\varrho \subset U$ (функция стоимости):

$$J(v) = PCy - z_0 P_{L_2(\Gamma_T)}^2 + (Nv, v)_U;$$

где $z_0(x,t)$ --- заданное наблюдение.

Заменим в правой части (3) f на $f + Bv$ ($v \in U$), прямым следствием теоремы 1 является следующее утверждение:

Теорема 2. Задача (3)--(5) (для $f + Bv, v \in U$) однозначно разрешима в $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ и имеет место непрерывность линейного отображения $v \rightarrow y(v)$ пространства U в $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Задача оптимального управления системой (3)--(5) (для $f + Bv, v \in U$) состоит в том, чтобы отыскать $\inf_{v \in U_\varrho} J(v)$.

Теорема 3. Задача оптимального управления системой (3)--(5) (для $f + Bv, v(x,t) \in U$) имеет единственное решение $v^* \in U_\varrho$, т.е. $J(v^*) = \inf_{v \in U_\varrho} J(v)$.

Доказательство. В силу утверждения теоремы 2 линейное отображение $v \rightarrow y(v)$ пространства управлений U в пространство состояний $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ непрерывно. Функционал $J(v)$ определяется с помощью двух операторов: 1) оператора $v \rightarrow y(v)$ перехода от управления v к состоянию $y(v)$, 2) оператора $y(v) \rightarrow Cy(v)$ перехода от состояния к наблюдению.

Преобразуем функционал $J(v)$ к следующему виду:

$$J(v) = PC(y(v) - y(0)) + Cy(0) - z P_{L_2(\Gamma_T)}^2 + (Nv, v)_U = \pi(v, v) - 2\ell(v) + PCy(0) - z P_{L_2(\Gamma_T)}^2,$$

где

$$\pi(u, v) = (C(y(u) - y(0)), C(y(v) - y(0)))_{L_2(\Gamma_T)} + (Nu, v)_U, \ell(v) = (z - Cy(0), C(y(v) - y(0)))_{L_2(\Gamma_T)}.$$

Доказательство завершается применением утверждения теоремы 1.1 [8, стр. 13], при этом учитывается очевидное неравенство $PCy(0) - z P_{L_2(\Gamma_T)}^2 \geq 0$.

Соотношения, определяющие оптимальное управление. Предварительно докажем следующее вспомогательное утверждение:

Лемма 3. Для любых $v, u \in U_\varrho$ имеет место соотношение

$$y'(u)(v - u) = y(v) - y(u) \quad (8)$$

(здесь $y'(u)$ --- производная по управлению u функции состояния $y(u)$).

Доказательство. Из соотношения (7) для произвольных фиксированных $v, u \in U_\varrho$ вытекает

$$\begin{aligned}
& + \int_{\Gamma_t} \left(- (y(v)(x,t) - y(u)(x,t)) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} \right) dxdt + \\
& + \int_{\Gamma_t} \left(- (y(v)(x,t) - y(u)(x,t)) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} \right) dxdt + \quad (9) \\
& + \ell_t((y(v)(x,t) - y(u)(x,t)), \eta(x,t)) = \\
& = \int_{\Gamma_t} B(v(x,t) - u(x,t)) \eta(x,t) dxdt
\end{aligned}$$

для любых $t \in [0, T]$ и при любой $\eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$. С другой стороны, соотношение (7) дает

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma} (y(u + \theta(v-u))(x,t) - y(v)(x,t)) \eta(x,t) dx + \\
& + \int_{\Gamma_t} -[y(u + \theta(v-u))(x,t) - \\
& - y(v)(x,t)] \frac{\partial \eta_t(x,t)}{\partial t} dxdt \\
& + \ell_t((y(u + \theta(v-u))(x,t) - y(v)(x,t)), \eta(x,t)) = \\
& = \theta \int_{\Gamma_t} B(v(x,t) - u(x,t)) \eta(x,t) dxdt
\end{aligned}$$

для любых $t \in [0, T]$ и при любой $\eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$. Деля обе части полученного соотношения на θ и вычисляя предел при $\theta \rightarrow 0$, приходим к соотношению

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma} y'(u)(x,t) (v(x,t) - u(x,t)) \eta(x,t) dx + \\
& + \int_{\Gamma_t} \left(-y'(u)(x,t) (v(x,t) - u(x,t)) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} \right) dxdt + \quad (10) \\
& + \ell_t(y'(u)(x,t) (v(x,t) - u(x,t)), \eta(x,t)) = \\
& = \int_{\Gamma_t} B(v(x,t) - u(x,t)) \eta(x,t) dxdt,
\end{aligned}$$

для любых $t \in [0, T]$ и при любой $\eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$. Сравнивая левые части соотношений (9) и (10), учитывая принадлежность $y'(u)(x,t)$ пространству $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, плотность $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$ в пространстве $L_2(\Gamma_T)$ (лемма 1), а также произвольность $t \in [0, T]$ и $\eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, получаем соотношение (8). Лемма доказана.

Теорема 4. Пусть множество U_δ ограничено.

Для того чтобы элемент $u(x,t) \in U_\delta$ был оптимальным управлением, необходимо и достаточно, чтобы удовлетворялись следующие соотношения

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma} y(u)(x,t) \eta(x,t) dx + \\
& + \int_{\Gamma_t} \left(-y(u)(x,t) \frac{\partial \eta_t(x,t)}{\partial t} \right) dxdt + \\
& + \ell_t(y(u)(x,t), \eta(x,t)) = \quad (11) \\
& = \int_{\Gamma} \varphi(x) \eta(x,0) dx + \int_{\Gamma_t} f(x,t) \eta(x,t) dxdt + \\
& + \int_{\Gamma_t} Bu(x,t) \eta(x,t) dxdt \\
& (\forall t \in [0, T], \forall \eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma_T} (Cy(u) - z_0) C(y(v) - y(u)) dxdt + \quad (12) \\
& + (Nu, v-u)_U \geq 0 \quad (\forall v \in U_\delta),
\end{aligned}$$

где $y(u) \in V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Доказательство. В соответствии с утверждением теоремы 1.3 [7, стр. 18] требуется показать, что неравенство (12) равнозначно неравенству $J'(u)(v-u) \geq 0$ для любого $v \in U_\delta$. Исходя из представления функционала $J(v)$, получим

$$\begin{aligned}
& J(u + \theta(v-u)) - J(u) = \\
& = (C_\theta y - z_0, C_\theta y - z_0)_{L_2(\Gamma_T)} + \\
& + (N(u + \theta(v-u)), u + \theta(v-u))_U - \\
& - (Cy(u) - z_0, Cy(u) - z_0)_{L_2(\Gamma_T)} - (Nu, u)_U,
\end{aligned}$$

откуда вытекает

$$\begin{aligned}
& J(u + \theta(v-u)) - J(u) = \\
& = (C_\theta y + Cy(u), C_\theta y - y(u))_{L_2(\Gamma_T)} - \\
& - 2(z_0, C_\theta y - y(u))_{L_2(\Gamma_T)} - 2(Nu, v-u)_U
\end{aligned}$$

(здесь $C_\theta y = C(y(u + \theta(v-u)))$). Деля последнее соотношение на θ , переходя к пределу при $\theta \rightarrow 0$ и учитывая соотношение (8) утверждения леммы, получаем

$$\begin{aligned}
& J'(u)(v-u) = \\
& = 2(Cy(u) - z_0, C(y(u) - y(v)))_{L_2(\Gamma_T)} - \\
& - 2(Nu, v-u)_U,
\end{aligned}$$

что и доказывает неравенство (12); соотношение (11) очевидно. Теорема доказана.

Неравенство (12) можно преобразовать с помощью сопряженного состояния системы (3)--(5), учитывая симметричность формы $\ell_t(\mu, \eta)$ ($t \in [0, T]$). Сделаем это для случая $C: L_2(\Gamma_T) \rightarrow L_2(\Gamma_T)$, тогда неравенство (12) можно переписать в виде

$$\begin{aligned}
& (C^*(Cy(u) - z_0), y(v) - y(u))_{L_2(\Gamma_T)} + \quad (13) \\
& + (Nu, v-u)_U \geq 0 \quad \forall v \in U_\delta
\end{aligned}$$

(здесь $C^* : L_2(\Gamma_T) \rightarrow L_2(\Gamma_T)$ --- сопряженный к C оператор).

Обозначим через $\ell_T(\mu, \nu)$ билинейную форму $\ell_t(\mu, \nu)$ при $t=T$. Для управления ν сопряженное состояние $\omega(v) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, $\omega(v)(x, T) = 0$ (сопряженное состояние $\omega(v)$ определено в пространстве, отличном от $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$, где определяется состояние $y(v)$), определим соотношением

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(v)(x, t)}{\partial t} \zeta(x, t) dxdt + \\ & + \ell_T(\omega(v)(x, t), \zeta(x, t)) = \\ & = \int_{\Gamma_T} C^*(C\omega(v)(x, t) - z_0(x, t)) \zeta(x, t) dxdt \\ & (\forall \zeta(x, t) \in W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)). \end{aligned} \quad (14)$$

Пусть $y(v)(x, t)$ --- решение (7), $y(u)(x, t)$ --- решение (7) при $\nu = u$. Положим в (14) $\nu = u$ и $\zeta(x, t) = y(v)(x, t) - y(u)(x, t)$ (последнее возможно, т.к. $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T) \subset W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$), получим, учитывая $\zeta(x, 0) = 0$,

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(u)(x, t)}{\partial t} (y(v)(x, t) - y(u)(x, t)) dxdt + \\ & + \ell_T(\omega(u)(x, t), y(v)(x, t) - y(u)(x, t)) = \\ & = \int_{\Gamma_T} C^*(C\omega(u)(x, t) - z_0(x, t)) \times \\ & \times (y(v)(x, t) - y(u)(x, t)) dxdt. \end{aligned} \quad (15)$$

С другой стороны из соотношения (11) при $t=T$ и $\eta(x, t) = \omega(u)(x, t)$ ($\omega(u)(x, T) = 0$) вытекает соотношение

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(u)(x, t)}{\partial t} (y(v)(x, t) - y(u)(x, t)) dxdt + \\ & + \ell_T(y(v)(x, t) - y(u)(x, t), \omega(u)(x, t)) = \\ & = \int_{\Gamma_T} B(v(x, t) - u(x, t)) \omega(u)(x, t) dxdt. \end{aligned} \quad (16)$$

Пусть $B^* : L_2(\Gamma_T) \rightarrow U$ --- оператор, сопряженный к B , причем $U = L_2(\Gamma_T)$ в силу сделанного выше предположения $U = L_2(\Gamma_T)$. Т.к. $\omega(u)(x, t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T) \subset L_2(\Gamma_T)$,

$B^* \omega(u)(x, t) \in L_2(\Gamma_T)$, то

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} B(v(x, t) - u(x, t)) \omega(u)(x, t) dxdt = \\ & = \int_{\Gamma_T} B^* \omega(u)(x, t) (v(x, t) - u(x, t)) dxdt. \end{aligned}$$

Отсюда, сравнивая в (15), (16) стоящие справа выражения и учитывая симметричность формы $\ell_T(y, \eta)$, приходим к равенству

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} C^*(C\omega(u)(x, t) - z_0(x, t)) \times \\ & \times (y(v)(x, t) - y(u)(x, t)) dxdt = \\ & = \int_{\Gamma_T} B^* \omega(u)(x, t) (v(x, t) - u(x, t)) dxdt, \end{aligned}$$

из которого вместе с (13) вытекает неравенство

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} (B^* \omega(u)(x, t) + Nu(x, t)) \times \\ & \times (v(x, t) - u(x, t)) dxdt \geq 0 \quad \forall v \in U_\delta, \end{aligned} \quad (17)$$

эквивалентное неравенству (13). Остаются справедливыми утверждения теоремы 4, где соотношение (12) заменено на соотношение (14) при $\omega(v) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, $\omega(v)(x, T) = 0$ и неравенство (17).

4. Задача оптимального управления параболической системой в пространстве $W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$. Рассмотрим начально-краевую задачу (3)–(5) в пространстве $W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$. Предположения относительно функций $a(x)$, $b(x)$ и $f(x, t)$, $\varphi(x)$ остаются теми же, что и в разделе 3.

Определение 2. Обобщенным решением класса $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ краевой задачи (3)–(5) называется функция $y(x, t) \in W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$, удовлетворяющая интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} \left(-y(x, t) \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} \right) dxdt + \\ & + \ell_T(y(x, t), \eta(x, t)) = \\ & = \int_{\Gamma} \varphi(x) \eta(x, 0) dx + \int_{\Gamma_T} f(x, t) \eta(x, t) dxdt \end{aligned} \quad (18)$$

для любых функций $\eta(x, t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, равных нулю при $t=T$. Используя обозначения пункта 3.1, приходим к соотношению

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} \left(-y(v)(x, t) \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} \right) dxdt + \\ & + \ell_T(y(v)(x, t), \eta(x, t)) = \\ & = \int_{\Gamma} \varphi(x) \eta(x, 0) dx + \int_{\Gamma_T} f(x, t) \eta(x, t) dxdt + \\ & + \int_{\Gamma_T} Bv(x, t) \eta(x, t) dxdt \end{aligned} \quad (19)$$

для любых функций $\eta(x, t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, равных нулю при $t=T$, получаемому из (18) заменой f на $f + Bv$, $v \in U$.

Все утверждения раздела 3 остаются справедливыми и для задачи оптимального управления в пространстве $W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ с той лишь разницей, что соотношения (6) и (7) заменяются на соответствующие им (18) и (19), а пространство $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ --- на $W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$. При этом в случае

$C: L_2(\Gamma_T) \rightarrow L_2(\Gamma_T)$, рассмотренном в пункте 3.2, для управления v сопряженное состояние $\omega(v)$ является элементом пространства $W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, удовлетворяет условию $\omega(v)(x, T) = 0$ и определяется соотношением (14). Имеет место

Теорема 5. Пусть множество U_δ ограничено.

Для того чтобы элемент $u(x, t) \in U_\delta$ был оптимальным управлением, необходимо и достаточно, чтобы удовлетворялись следующие соотношения:

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} \left(-y(v)(x, t) \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} \right) dxdt + \\ & + \ell_T(y(v)(x, t), \eta(x, t)) = \int_{\Gamma} \varphi(x) \eta(x, 0) dx + \\ & + \int_{\Gamma_T} f(x, t) \eta(x, t) dxdt + \int_{\Gamma_T} Bv(x, t) \eta(x, t) dxdt \end{aligned}$$

для любых $\eta(x, t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$,

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(v)(x, t)}{\partial t} \zeta(x, t) dxdt + \\ & + \ell_T(\omega(v)(x, t), \zeta(x, t)) = \\ & = \int_{\Gamma_T} C^*(C\omega(v)(x, t) - z_0(x, t)) \zeta(x, t) dxdt \end{aligned}$$

для любых $\zeta(x, t) \in W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$,

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} (B^* \omega(u)(x, t) + Nu(x, t)) \times \\ & \times (v(x, t) - u(x, t)) dxdt \geq 0 (\forall v \in U_\delta) \end{aligned}$$

для любых $v \in U_\delta$. Здесь $u(u) \in V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$, $\omega(v) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$ и $\omega(v)(x, T) = 0$.

5. Управляемость дифференциальной системы (3). Приведем определение управляемости системы (3) в редакции, принятой в монографии [8, с. 214].

Определение 3. Система (3), состояние которой определяется как решение начально-краевой задачи (3)–(5), называется управляемой (в момент времени T), если наблюдение $Sy(v)$ замечает подпространство, плотное в пространстве наблюдений $L_2(\Gamma_T)$, когда управление v пробегает все пространство управлений U .

Покажем, что рассматриваемая система (3) управляема. Пусть функция $\psi(x, t)$ из пространства наблюдений $L_2(\Gamma_T)$ ортогональна к подпространству, замечаемому наблюдением $Sy(v)$: $\int_{\Gamma_T} \rho(x, t) y(v)(x, t) dxdt = 0$ для любых $v \in U$.

Рассмотрим функцию $p(x, t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$ как обобщенное решение начально-краевой задачи

$$\begin{aligned} & - \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \right) + \\ & + b(x) p(x, t) = \psi(x, t), \end{aligned} \quad (20)$$

$$p(x, T) = 0, x \in \Gamma, \quad p|_{x \in \partial \Gamma} = 0, t \in (0, T), \quad (21)$$

т. е. функция $p(x, t)$ ($p(x, T) = \rho(x)$, $x \in \Gamma$) удовлетворяет интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \zeta(x, t) dxdt + \ell_T(p, \zeta) = \\ & = \int_{\Gamma_T} \psi(x, t) \zeta(x, t) dxdt \end{aligned} \quad (22)$$

для любой $\zeta(x, t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Доказательство однозначной разрешимости задачи (20), (21) почти дословно повторяет рассуждения аналогичной теоремы работы [5].

Положим в соотношении (22) $\zeta(x, t) = y(v)(x, t) - y(u)(x, t) \in V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T) \subset W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, получим, учитывая $\int_{\Gamma_T} \rho(x, t) y(v)(x, t) dxdt = 0$ для

всех $v \in U$

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dxdt + \\ & + \ell_T(p, y(v) - y(u)) = \\ & = \int_{\Gamma_T} \psi(x, t) [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dxdt = 0. \end{aligned}$$

С другой стороны, из соотношения (7) для $y(v)(x, t)$ и $y(u)(x, t)$ при $t = T$ и $\eta(x, t) = p(x, t)$ (последнее возможно, т. к. $\eta(x, t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ и $\eta(x, T) = 0$), получаем

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dxdt + \\ & + \ell_T(y(v) - y(u), p) = \\ & = \int_{\Gamma} B[y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] p(x, t) dxdt \end{aligned}$$

для любых v и u из U . В силу $B[y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] \in L_2(\Gamma_T)$ для любых v и u из $U = L_2(\Gamma_T)$ получаем $p(x, t) = 0$, а значит, и $\psi(x, t) = 0$ на $L_2(\Gamma_T)$. Следовательно, справедлива

Теорема 6. Система (3), состояние которой определяется как обобщенное решение начально-краевой задачи (3)–(5) в пространстве $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$, управляема.

Замечание 1. Все представленные выше результаты остаются справедливыми и для пространства $W_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ состояний дифференциальной системы (3).

Замечание 2. Задача распределенного управления системой (3) в пространстве $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ (пространство состояний дифференциальной системы (3) со смешанными краевыми условиями) мало чем отличается от таковой в $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$. Все утверждения теорем 4–6 сохраняются: пространство $V_{2,0}^{1,0}(a, \Gamma_T)$ заменяется на $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, краевое условие

(5) в задаче (3)--(5), определяющей сопряженное состояние системы (2), --- на краевое условие вида

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} + \sigma y(x,t) |_{\partial \Gamma} = 0$$

(постоянная σ своя для каждого граничного ребра $\gamma: \sigma = \sigma_\gamma, \gamma \subset \partial \mathcal{R}$). Обобщенное решение $y(x,t)$ такой начально-краевой задачи определяется в пространстве $W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ и удовлетворяет тождеству

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma_T} \left(-y(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} \right) dx dt + \ell_T(y, \eta) + \\ & + \sum_{\gamma \in \partial \mathcal{R}} \sigma_\gamma \int_0^T y(x,t) \eta(x,t) |_{x=\epsilon_\gamma} dt = \\ & = \int_{\Gamma} v(x) \eta(x,0) dx + \int_{\Gamma_T} f(x,t) \eta(x,t) dx dt \end{aligned}$$

для любой $\eta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$, равной нулю при $t = T$.

Соотношение для сопряженного состояния $\omega(v)(x,t)$ системы (3)--(5) (условие теоремы 5) принимает вид

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(v)(x,t)}{\partial t} \zeta(x,t) dx dt + \ell_T(\omega(v), \zeta) + \\ & + \sum_{\gamma \in \partial \mathcal{R}} \sigma_\gamma \int_0^t \omega(x,t) \zeta(x,t) |_{x=\epsilon_\gamma} dt = \\ & = \int_{\Gamma_T} C^*(C\omega(v)(x,t) - z_0(x,t)) \zeta(x,t) dx dt, \end{aligned}$$

для любых функций $\zeta(x,t) \in W_{2,0}^1(a, \Gamma_T)$.

6. Заключение. В работе рассмотрен достаточно распространенный в приложениях случай распределенного управления $v \in U = L_2(\Gamma)$ и произвольного наблюдения $Sy(v)$ для дифференциальной системы (3), состояние $y(v)(x,t)$ которой описывается решением начально-краевой задачей (3)--(5). Хотя применение методов демонстрируется для указанных управления и наблюдения, используемые приемы обладают большой общностью и применимы к другим видам управлений и наблюдений, например граничным [9, 10]. В последнем случае $U = L_2(\partial \Gamma_T)$, а состояние системы (3) определяется как обобщенное решение задачи (3)--(5) с краевым условием $y|_{\partial \Gamma} = v$ вместо (5). При этом необходимо рассматривать след функции $y(v)$ на $\partial \Gamma_T$ (или части $\partial \Gamma_T$); сопряженное состояние системы описывается уравнениями, задаваемыми как на Γ_T , так и на $\partial \Gamma_T$. Следует отметить, что в работах [11--22] рассмотрены другие подходы при анализе прикладных задач управления и родственных им задач оптимизации, имеющие, однако, аналогичную трактовку (в терминах сопряженного состояния) условий существования оптимального управления. Отметим также, что изучаемая задача допускает в представлении уравнения (5) особенности в виде

стохастической компоненты [23] и разрывной нелинейности [24--26].

Литература

1. Подвальный, С.Л. Оптимизация по стартовым условиям параболической системы с распределенными параметрами на графе [Текст] / С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 58, - № 4. - С. 70-74.
2. Подвальный, С.Л. Определение стартовой функции в задаче наблюдения параболической системы с распределенными параметрами на графе [Текст] / С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 6. - С. 29-35.
3. Провоторов, В.В. Собственные функции задачи Штурма-Лиувилля на графе-звезде [Текст] / В.В. Провоторов // Математический сборник. - 2008. - Т. 199. - № 10. - С. 105-126.
4. Провоторов, В.В. Разложение по собственным функциям задачи Штурма-Лиувилля на графе-пучке [Текст] / В.В. Провоторов // Известия высших учебных заведений. Математика. - 2008. - № 3. - С. 50-62.
5. Волкова, А. С. О разрешимости краевых задач для уравнений параболического и гиперболического типов на геометрическом графе [Текст] / А.С. Волкова, Ю.А. Гнилицкая, В.В. Провоторов // Системы управления и информационные технологии. - 2013. - № 1 (51). - С. 11-15.
6. Провоторов, В.В. Оптимальное управление параболической системой с распределенными параметрами на графе [Текст] / В.В. Провоторов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2014. - Вып. 3. - С. 154-163.
7. Провоторов, В.В. Начально-краевые задачи с распределенными параметрами на графе. [Текст] / В.В. Провоторов, А.С. Волкова // Воронеж: Изд-во "Научная книга". - 2014. - 188 с.
8. Лионс, Ж.Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными [Текст] / Ж.Л. Лионс // пер. с фр. Н. Х. Розова; под ред. Р. В. Гамкрелидзе. М.: Мир. - 1972. - 414 с.
9. Провоторов, В.В. К вопросу построения граничных управлений в задаче о гашении колебаний системы "мачта-растяжки". [Текст] / В.В. Провоторов // Системы управления и информационные технологии. - 2008. - Т. 32. - № 2.2. - С. 293-297.
10. Провоторов, В.В. Граничное управление волновой системой в пространстве обобщенных решений на графе [Текст] / В.В. Провоторов, Ю.А. Гнилицкая // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2013. - Вып. 3. - С. 112-120.
11. Волкова, А.С. Обобщенные решения и обобщенные собственные функции краевых задач на геометрическом графе [Текст] / А.С. Волкова, В.В. Провоторов // Известия высших учебных заведений. Математика. - 2014. - № 3. - С. 3-18.
12. Подвальный, С.Л. Особенности поисковой градиентной оптимизации сложных объектов с использованием сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 56. - № 2. - С. 18-22
13. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: концепция, состояние и перспективы [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Управление большими системами: сб. трудов. Москва: Изд-во ИПУ РАН. - 2014. - № 48. - С. 6-58.

14. Подвальный, С.Л. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 57, - № 3.-С. 4-8.

15. Podval'ny, S.L. Intelligent Modeling Systems: Design Principles [Text] / S.L. Podval'ny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. - 2013. - Vol. 74, - N 7. - P. 1201-1210.

16. Подвальный, С.Л. Решение задач градиентной оптимизации каскадно-реакторных схем с использованием сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, - № 2. - С. 27-32.

17. Александров, А.Ю. Об асимптотической устойчивости решений нелинейных систем с запаздыванием [Текст] / А.Ю. Александров, А.П. Жабко // Сибирский математический журнал. - 2012. - Т. 53, - № 3. - С. 495-508.

18. Александров, А.Ю. Об устойчивости решений одного класса нелинейных систем с запаздыванием. [Текст] / А.Ю. Александров, А.П. Жабко // Автоматика и телемеханика. - 2006. - № 9. - С. 3-14.

19. Александров, А.Ю. Об асимптотической устойчивости решений одного класса систем нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием [Текст] / А.Ю. Александров, А.П. Жабко // Известия вузов. Математика. - 2012. - № 5. - С. 3-12.

20. Волкова, А.С. Модели и численные методы исследования диффузионных и волновых процессов в сетеподобных системах [Текст] : автореф. дис. ... канд.

техн. наук : 05.13.18 / А.С. Волкова – Воронеж, 2014. – 18 с

21. Веремей, Е.И. Многоцелевая стабилизация динамических систем одного класса [Текст] / Е.И. Веремей, В.М. Корчанов // Автоматика и телемеханика. - 1988. - № 9. - С. 126-137.

22. Веремей, Е.И. Стабилизация плазмы на базе прогноза с устойчивым линейным приближением [Текст] / Е.И. Веремей, М.В. Сотникова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2011. - Вып. 1. - С. 116-133.

23. Карелин, В.В. Штрафные функции в задаче управления процессом наблюдения [Текст] / В.В. Карелин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2010. - Вып. 4. - С. 109-114.

24. Потапов, Д.К. Оптимальное управление распределенными системами эллиптического типа высокого порядка со спектральным параметром и разрывной нелинейностью [Текст] / Д.К. Потапов // Изв. РАН. ТиСУ. - 2013. - № 2. - С. 19-24.

25. Volkova, A.S. On the Solvability of Boundary-Value Problems for Parabolic and Hyperbolic Equations on Geometrical Graphs. [Text] / A.S. Volkova, Yu.A. Gnilitskaya, V.V. Provotorov // Automation and Remote Control. - 2014. - Vol. 75, - N 2. - P. 405-412.

26. Provotorov, V.V. Boundary control of a parabolic system with distributed parameters on a graph in the class of summable functions [Text] / V.V. Provotorov // Automation and Remote Control. Automation and Remote Control. - 2015. - T. 76. - № 2. - С. 318-322.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский государственный университет

CONTROLLABILITY OF A DIFFERENTIAL SYSTEM OF PARABOLIC TYPE WITH DISTRIBUTED PARAMETERS ON THE GRAPH

S.L. Podvalny, V.V. Provotorov

For differential system which state is described by a parabolic initial and regional task with the distributed parameters on the column, the problem of the distributed management in a class of weak decisions is considered. Thus management and supervision at the same time are distributed on the column, the living conditions of the only management, ratios characterizing optimum control are received, controllability of differential system is shown

Key words: differential system with distributed parameters on the graph, weak solutions of boundary control and observation

АНАЛИЗ И ВЫБОР СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТНО-РЕЛЯЦИОННОЙ СУБД МЕДИЦИНСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В.А. Васильченко, В.Л. Бурковский

В работе рассмотрены выбор и реализация СУБД, требуемой для создания распределенной медицинской информационной системы

Ключевые слова: объект, модель данных, диагностика

За последнее время в России появилось множество уникальных разработок в области создания комплексных, территориально распределенных медицинских информационных систем, предназначенных для автоматизации работы учреждений здравоохранения. Одними из наиболее эффективных с практической точки зрения являются: информационная система "Интерин", МИС "Амулет", МИС "Артемиды", и ряд других [1-6]. Данные системы являются открытыми и активно развиваются по всем направлениям программно-аппаратного обеспечения.

В настоящее время актуальной является проблема разработки объектно-ориентированных информационных систем, предназначенных для решения задач автоматизации не только процессов обработки медицинских данных в территориально-удаленном решении, но и проведения мониторинга развития патологических заболеваний на территориях.

Также происходит активное развитие автоматизации процессов диагностики и принятия врачебных решений, в том числе в области пульмонологии. Ниже рассматривается комплексный подход к автоматизации процесса постановки диагноза больных с заболеванием легких, выбора тактики лечения, а также мониторинга развития легочных заболеваний в пределах конкретного региона на основе объектно-реляционной СУБД. В качестве клиентской операционной системы предлагается использовать Microsoft Windows. При формировании данного подхода было проведено исследование по изучению эффективности различных методик проектирования базы данных в системе управления тактикой лечения легочных заболеваний. Выделяют три основных типа СУБД: объектно-ориентированные, реляционные и объектно-реляционные.

Объектно-реляционная модель данных является объектной моделью с некоторыми свойствами и возможностями реляционной модели данных, или наоборот. Однозначного определения не существует.

Объектно-реляционная СУБД (ОРСУБД) — это реляционная СУБД (РСУБД), которая поддерживает основные и наиболее востребованные технологии, которые реализуют объектно-ориентированный подход: объекты, классы и наследование реализованы в языке запросов и структуре баз данных [7-10].

В соответствии с подходом UniSQL, в объектно-реляционной системе управления базой данных необходимо поддерживать следующие функции системы:

- наследование;
- инкапсуляцию;
- полиморфизм;
- композицию классов;
- n-мерное объектно-ориентированное моделирование;
- интерфейсы, используемые языками третьего поколения;
- интерфейсы, используемые языками четвертого поколения;
- реляционный доступ или соединение;
- непроцедурный доступ через запросы;
- двухмерное реляционное моделирование;
- постоянство существования объектов (object persistence);
- независимость служб баз данных от файловых систем;
- поддержку оперативных служб СУБД;
- доступ к объектам, используя навигацию;
- интерфейсы для традиционных языков третьего поколения;
- хранение данных, не зависящих от языка.

Раньше приложения разрабатывались с расчетом на модификацию и доступ к корпоративным данным, которые должны были храниться в таблицах (в том числе и в медицинских системах), составленных из типов данных, таких как INTEGER, NUMBER, DATE и CHAR, которые использует SQL [11-13]. С появлением СУБД Oracle8, поддерживаются не только эти типы данных, но также и новые объектные, которые являются частью актуального в настоящее время стандарта ANSI SQL:99.

Объектные типы. Компания Oracle создала расширение SQL (как DDL, так и DML), чтобы предоставить пользователям следующие возможности [14-15]:

— хранить экземпляры (объекты) в базе данных (в качестве таблиц, либо в их столбцах);

— определять свои новые собственные типы (представляющие их бизнес-объекты) и связи (наследование, агрегирование и т. д.) между этими, определяемыми разработчиками, типами;

— запрашивать, изменять и вставлять эти экземпляры.

Бизнес-объект имеет следующие свойства и возможности:

— может находиться внутри другого бизнес-объекта;

— имеет возможность получения доступа к другому бизнес-объекту;

— на него может ссылаться другой объект (используя конструкцию, называемую REF);

— возможность манипуляции наборами (sets) или с коллекциями (collections), используя структуры, которые называются массивами переменной длины (VARRAYS) и вложенными таблицами (Nested Tables).

Объектно-реляционные конструкции СУБД Oracle9i в значительной мере очень похожи на реляционные, которые весьма хорошо знакомы разработчикам и пользователям СУБД Oracle. Например, ссылка REF аналогична внешнему (foreign) ключу, методы, по сути, являются хранимыми процедурами (которые могут быть написаны на языках C/C++, Java или PL/SQL). Модели транзакций и безопасности, которые оперируют с объектными типами, являются аналогичными моделям, определяемым для реляционных таблиц.

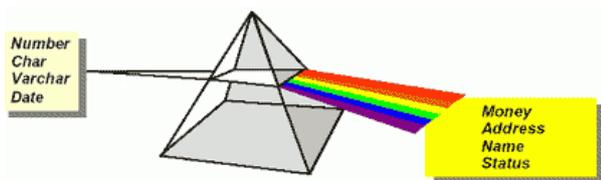


Рис. 1. Использование конструкций предметной области

Данная система объектных типов данных существенно повышает уровень абстракции, на котором разрабатываются распределенные информационные системы для работы с базами данных. Вместо оперирования типами данных, таких как NUMBER, CHAR, INTEGER, DOUBLE и т.д., эти информационные системы могут работать с конструкциями предметной области, такими как Customer, Money или Portfolio, вследствие этого можно воспользоваться рядом преимуществ, основным из которых является лучшее моделирование распределенной системы в базе данных.

Объектные представления. С другой стороны, СУБД Oracle9i также дает возможность разработчику рассматривать реляционные данные и в качестве объектов. Объектные представления

(Object Views) позволяют создавать бизнес-объект из уже существующих данных, которые продолжают храниться в реляционных таблицах.

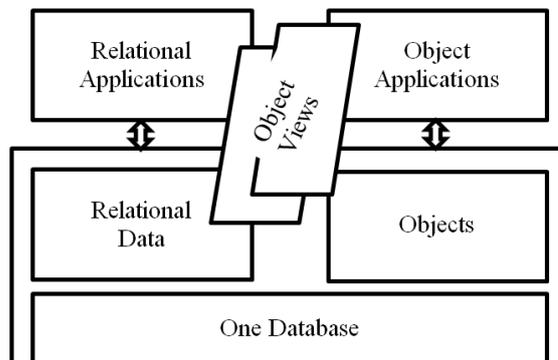


Рис. 2. Гибкость объектных представлений при доступе к унаследованным данным

Абсолютно полная поддержка объектно-реляционной системы типов Oracle доступна для многих современных языков программирования, включая такие, как PL/SQL, Java и C/C++. К экземплярам типов имеется возможность получения доступа, и с ними можно взаимодействовать через интерфейсы прикладного программирования, такие как OCCI (Oracle C++ Call Interface) и JDBC (Java DataBase Connectivity). Международная компания Oracle обеспечивает инструментами подобными утилите JPublisher и транслятору объектных типов Object Type Translator (ОТТ) для отображения иерархий объектных типов в таких языках, как Java и C++. Более того, в средах этих языков также поддерживается подстановочность ссылок REF и экземпляров.

В качестве основной СУБД, которая использовалась при создании распределенной медицинской информационной системы, является Oracle Database 11g Express Edition Release 2. Разработка программного обеспечения осуществлялась в среде Microsoft Visual Studio 2008.

В рамках рассматриваемого подхода была разработана информационная система регионального медицинского мониторинга, позволяющая диагностировать легочные заболевания пациентов и совершать их мониторинг в пределах данного региона. Разработка позволит увеличить эффективность лечения пациентов, ускорить диагностику их заболеваний, производить мониторинг заболеваний в реальном времени, а также проверять эффективность выбранных способов лечения пациентов.

Разрабатываемая информационная система должна обеспечивать:

— ввод, редактирование и хранение данных о современных медицинских препаратах;

— ввод, редактирование и хранение данных о пациентах;

— диагностику легочного заболевания у пациента на основе предложенных симптомов;

- просмотр истории болезни пациента;
- проверку эффективности существующего метода лечения;
- мониторинг заболеваний легких по данному региону.

Основные структурные элементы информационной системы (рис. 3).



Рис. 3. Структура информационной системы медицинского мониторинга

Данная система значительно упростит работу врачей по диагностике легочных заболеваний пациентов. Результатом использования системы станет более точная постановка диагноза пациентам, быстрая оценка эффективности лечения, а также мониторинг заболеваний легких по любому региону нашей страны. Все это, в конечном счете, способствует достижению финальной цели деятельности — оказанию качественных медицинских услуг.

Литература

1. Айламазян, А.К. Данные, документы и архитектура медицинских информационных систем [Текст] / А. К. Айламазян, Я. И. Гулиев // Тез. докл. Международного форума «Информатизация процессов охраны здоровья населения – 2001», 2001. - С. 141-142.
2. Андерсон, К. Локальные сети. Полное руководство [Текст]: пер. с англ. / К. Андерсон, М. Минаси. – К. : ВЕК+, 1999. – 624 с.

Воронежский государственный технический университет

ANALYSIS AND SELECTION OF THE STRUCTURE OF OBJECT-RELATIONAL DATABASE OF MEDICAL INFORMATION SYSTEM

V. A. Vasilchenko V.L. Burkovsky

The selection and implementation of the database required for the creation of distributed medical information system was considered in the work

Key words: object, data model, diagnostics

3. Урман, С. Oracle9i. Программирование на языке PL/SQL [Текст] / С. Урман. – М.: Лори, 2004. – 529 с.

4. Андреев, А.М. Выбор СУБД для построения информационных систем корпоративного уровня на основе объектной парадигмы [Текст] / А. М. Андреев, Д. В. Березкин, Ю. А. Кантонистов // СУБД, 1998. – № 4-5. – С. 26–50.

5. Губин, И.М. Разработка и внедрение новой автоматизированной информационной системы ЦКБ [Текст] / И.М. Губин и др. // Кремлевская медицина. Клинический вестник. – 2000. – № 4. – С. 51–54.

6. Дуданов, И.П. Создание "паспорта здоровья" больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями с использованием информационной системы [Текст] / И.П. Дуданов и др. // Медицинский академический журнал. – 2003. – Том 3. – № 3. – С. 125–133.

7. Кузнецов, С.Д. Концептуальное проектирование реляционных баз данных с использованием языка UML [Текст] : [Электронный ресурс] / С.Д. Кузнецов – Режим доступа: Worl Wide Web. URL: <http://www.citforum.ru/database/articles/umlbases.shtml>.

8. Фернстейн, С. Подставляемость и преобразование объектных типов в иерархии [Текст] : [Электронный ресурс] / С. Фернстейн. – Режим доступа: Worl Wide Web. URL: http://www.oracle.com/oramag/june2002/index.html?dev_subst.html.

9. Орлик, С. Обзор спецификации JDBC – Системы управления базами данных [Текст] : [Электронный ресурс] / С. Орлик. – Режим доступа: Worl Wide Web. URL: <http://www.osp.ru/dbms/1997/03/21.htm>.

10. Гусев, А.В. Информационные системы в здравоохранении [Текст] / А.В. Гусев и др. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. – 120 с.

11. Гусев, А.В. Особенности в проектировании и практической разработке медицинской информационной системы [Текст] : [Электронный ресурс] / А.В. Гусев. – Режим доступа: Worl Wide Web. URL: <http://citforum.ru/consulting/articles/med/>.

12. Шерпер, Ж. Информационные системы в здравоохранении: технология и организация [Текст] / Ж. Шерпер // Кремлевская медицина. Клинический вестник. – 2000. – № 4. – С. 15–17.

13. Microsoft Corporation. Принципы проектирования и разработки программного обеспечения. Учебный курс MCSD [Текст]: / Microsoft Corporation, пер. с англ. – М.: Русская Редакция, 2002. – 736 с.

14. Ramamoorthy, C.V. Software Engineering: problems and perspectives [Текст] / C. V. Ramamoorthy и др. // Computer. Outubro. – 1984. – № 10. – С. 191–209.

15. Claudio G.A. A Software Engineering Approach to the Development of Computer-Based Patient Record Systems [Текст]: [Электронный ресурс] : Режим доступа: Worl Wide Web. URL: <http://home.nib.unicamp.br/~claudiog/slides/seandcpr/seandcpr.htm>.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ

С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев

Рассматривается задача стабилизации систем многоальтернативного управления на примере структурно неустойчивого объекта. На основе декомпозиции исходной модели на подсистемы с выделенной неизменяемой частью определён класс допустимых управлений, обеспечивающих указанную стабилизацию при произвольном законе переключения альтернатив

Ключевые слова: многоальтернативные системы, структурная неустойчивость, декомпозиция, стабилизация объектов

1. Постановка задачи

Реализация принципов многоальтернативности в системах автоматического регулирования предусматривает достижение цели управления на основе некоторого множества алгоритмов, используемых в соответствии с текущим состоянием объекта [1-7]. Порождаемое указанным подходом разнообразие режимов функционирования многоальтернативной системы управления приводит к задаче анализа её устойчивости в следующей постановке [8,9]:

будет ли система, устойчивая отдельно с каждым из используемых алгоритмов управления, устойчивой при произвольном переключении этих алгоритмов в процессе работы;

каким должен быть класс допустимых управлений, гарантирующих устойчивость таких систем, в том числе и в случае, когда объект управления является структурно неустойчивым, то есть остаётся таковым при любых значениях своих параметров.

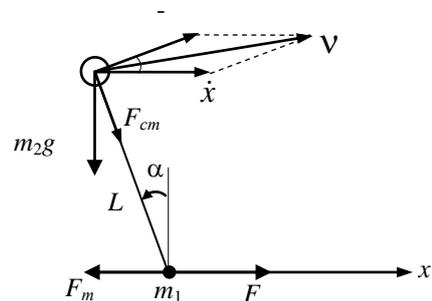
Поставленные задачи могут быть решены на основе теории гибридных систем, в рамках которой в предлагаемой работе рассматривается решение второй из сформулированных выше задач: нахождение класса законов стабилизирующего многоальтернативного управления структурно неустойчивым объектом. В качестве примера такого объекта используется модель обратного маятника.

2. Модель объекта управления

Рассмотрим модель обратного маятника, установленного на опоре, горизонтально перемещаемой с некоторым трением под действием внешней управляющей силы. Расчётная схема маятника представлена на рисунке [10].

На рисунке обозначены: m_1 , m_2 – массы опоры и сосредоточенная масса маятника соответственно; L – длина маятника; x – координата, характеризующая горизонтальное положение опоры маятника; α – угол отклонения маятника от вертикали; g – ускорение свободного падения; ω – угловая скорость; μ – коэффициент сухого трения опоры; F_{mp} – сила сухо-

го трения; F – внешняя сила, приложенная к подвижной опоре; F_{cm} – сила, действующая вдоль стержня маятника.



Расчётная схема объекта управления

Опишем движение объекта в координатах x и α в виде уравнений Лагранжа:

$$\begin{cases} -\frac{\partial E}{\partial x} + \frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{x}} = F - F_{mp}; \\ -\frac{\partial E}{\partial \alpha} + \frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{\alpha}} = m_2 g L \sin \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где E – кинетическая энергия системы:

$$E = \frac{m_1 + m_2}{2} \dot{x}^2 + \frac{m_2 L^2}{2} \dot{\alpha}^2 - m_2 L \dot{x} \dot{\alpha} \cos \alpha. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} - m_2 L (\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) = F - F_{mp}; \\ -\ddot{x} \cos \alpha + L \ddot{\alpha} = g \sin \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Силу F_{mp} сухого трения определим в виде:

$$F_{mp} = \mu (m_1 g + F_{cm} \cos \alpha) \text{sign}(\dot{x}),$$

где продольная сила F_{cm} :

$$F_{cm} = m_2 g \cos \alpha - m_2 \ddot{x} \sin \alpha - m_2 \dot{\alpha}^2 L.$$

В итоге, движение рассматриваемого объекта полностью опишется системой уравнений:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} - m_2 L (\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) = F - F_{mp}; \\ F_{mp} = \mu [m_1 g + m_2 \cos \alpha (g \cdot \cos \alpha - \ddot{x} \sin \alpha - \dot{\alpha}^2 L) \text{sign}(\dot{x})]; \\ -\ddot{x} \cos \alpha + L \ddot{\alpha} - g \sin \alpha = 0, \end{cases} \quad (4)$$

определяющей в качестве регулируемых величин угловое положение $\alpha(t)$ маятника и координату $x(t)$ его подвижной опоры, а также общий порядок объекта, равный четырём.

3. Анализ устойчивости объекта

Примем за положение равновесия координаты $x = \dot{x} = 0$ и $\alpha = \dot{\alpha} = 0$ (перевернутое вертикальное положение маятника) и перепишем систему (4) для малых отклонений около этого положения в автономном режиме:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} - m_2L\ddot{\alpha} = 0; \\ -m_2L\ddot{x} + m_2L^2\ddot{\alpha} - m_2Lg\alpha = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Представим (5) в виде:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = 0 \quad (6)$$

в котором $q = [x \ \alpha]^T$ – вектор координат состояния;

$$A = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & -m_2L \\ -m_2L & m_2L^2 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -m_2Lg \end{bmatrix}.$$

Формальный анализ асимптотической устойчивости положения равновесия объекта (6) проведём с помощью характеристической матрицы

$$f(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + Cq,$$

одно из собственных значений которой:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\sqrt{m_1Lg(m_1 + m_2)}}{m_1L} & -\frac{\sqrt{m_1Lg(m_1 + m_2)}}{m_1L} \end{bmatrix}^T$$

остаётся положительным при любых значениях параметров m_1 , m_2 и L , т.е. объект структурно неустойчив.

4. Декомпозиция исходной модели

Введём в (6) возможность многоальтернативного позиционного управления $C_{\sigma(t)}q$, $C_{\sigma(t)} = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ с некоторым неизвестным законом $\sigma(t)$ переключения N альтернатив:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + C_{\sigma(t)}q = 0. \quad (7)$$

Использование этой модели для анализа устойчивости системы вторым методом Ляпунова предполагает существование общей функции Ляпунова для всех N альтернатив (7) с разными $C_{\sigma(t)}$.

Условием существования такой функции Ляпунова является коммутативность матричных коэффициентов $D_i D_j = D_j D_i$, $i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, N}$, [9]:

$$D = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ -A^{-1}C_{\sigma(t)} & -A^{-1}B \end{bmatrix}.$$

где I – единичная матрица.

Для рассматриваемой задачи получаем:

$$D_i D_j = -A^{-1} \begin{bmatrix} C_j & B \\ -BA^{-1}C_j & C_i - BA^{-1}B \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$D_j D_i = -A^{-1} \begin{bmatrix} C_i & B \\ -BA^{-1}C_i & C_j - BA^{-1}B \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Из сопоставления (8) и (9) вытекает, что условие $D_i D_j = D_j D_i$ выполняется только при равенстве $C_i = C_j$, исключающем наличие альтернатив.

Для определения условий многоальтернативной стабилизации системы (7) выделим из неё две изолированные подсистемы, т.е. осуществим декомпозицию [9,12]:

$$A\dot{z} + Bz = 0; \quad (10)$$

$$B\dot{v} + C_{\sigma(t)}v = 0. \quad (11)$$

Представив (11) в виде:

$$\dot{v} = -B^{-1}C_{\sigma(t)}v, \quad (12)$$

получим, что в (12) условие коммутативности альтернативных матричных коэффициентов выполняется:

$$B^{-1}C_i \cdot B^{-1}C_j = B^{-1}C_j \cdot B^{-1}C_i, \quad (13)$$

так как для любого невырожденного C_i можно найти $C_j \neq C_i$, при котором справедливо (13).

Отсюда следует, что для всех альтернативных подсистем (11) существует общая функция Ляпунова и появляется возможность осуществить анализ устойчивости системы (7) вторым методом Ляпунова.

5. Анализ устойчивости системы

Воспользуемся теоремой [9]:

если подсистема (10) асимптотически устойчива;

и все подсистемы (11) асимптотически устойчивы и для них существует непрерывно дифференцируемая общая однородная второго порядка функция Ляпунова, удовлетворяющая условиям теоремы Ляпунова об асимптотической устойчивости;

то при достаточно значительном доминировании скоростных компонент $B\dot{q}$ положение равновесия $q = \dot{q} = 0$ системы (7) экспоненциально устойчиво при произвольном законе переключения $\sigma(t)$.

Проверим условия теоремы для рассматриваемого случая [12].

Для асимптотической устойчивости (10) достаточно положительной определённости квадратичной формы функции Ляпунова $V_1(z) = z^T A z$ и отрицательной определённости её производной $\dot{V}_1(z) = -2z^T B z$.

Положительная определённость $V_1(z)$ в соответствии с критерием Сильвестра подтверждается положительностью главных диагональных миноров матрицы A :

$$\Delta_1 = (m_1 + m_2) > 0,$$

$$\Delta_2 = (m_1 + m_2)m_2L^2 - m_2^2L^2 = m_1m_2L^2 > 0,$$

сохраняемой при любых значениях параметров объекта.

Условие отрицательной определённости $\dot{V}_1(z) = -2z^T B z$ требует положительности главных миноров матрицы B , из чего следует что в систему (7) должны быть введены скоростные компоненты $b_x \dot{x}$ и $b_\alpha \dot{\alpha}$, например, в виде:

$$B = \begin{bmatrix} b_x \dot{x} & 0 \\ 0 & b_\alpha \dot{\alpha} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

с достаточно большими коэффициентами b_x и b_α , обеспечивающими доминирование скоростных компонент управления.

Асимптотическая устойчивость подсистемы (11) требует положительной определённости квадратичной формы $V_2(v) = v^T B v$ и отрицательной определённости её производной $\dot{V}_2(v) = -2v^T C_{\sigma(t)} v$.

Для матрицы B указанное требование выполняется при положительности коэффициентов $b_x > 0$ и $b_\alpha > 0$, обеспечиваемой знаком отрицательной обратной связи управления по координатам \dot{x} и $\dot{\alpha}$.

Положительность главных диагональных миноров матрицы $C_{\sigma(t)}$ предполагает введение в систему (7) компонент позиционного управления $c_{x,\sigma(t)}x$ и $c_{\alpha,\sigma(t)}\alpha$ в виде:

$$C_{\sigma(t)} = \begin{bmatrix} c_{x,\sigma(t)} & 0 \\ 0 & c_{\alpha,\sigma(t)} - m_2 L g \end{bmatrix}, \quad (15)$$

из которого вытекает, что на позиционные компоненты стабилизирующего управления накладываются требования преобладания над потенциальными силами в объекте $c_{x,\sigma(t)} > 0$ и $c_{\alpha,\sigma(t)} > m_2 L g$ для всех вариантов многоальтернативного управления.

6. Заключение

Показано, что для стабилизации рассматриваемого структурно неустойчивого объекта достаточно введения многоальтернативного управления, содержащего позиционные и скоростные компоненты, отвечающие условиям доминирования скоростных составляющих и преобладания позиционных сил управления над потенциальными силами, действующими в объекте.

Стабилизация объекта в указанном классе воздействий обеспечивается при произвольном законе переключения альтернативных управлений.

Литература

1. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 2. – С. 4–13.
2. Подвальный, С.Л. Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев //

Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2014. – № 48. – С. 6–58.

3. Подвальный, С.Л. Многоальтернативное поведение в критических режимах как модель биологического процесса принятия решений [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2015. – № 2. – С. 105–113.

4. Подвальный, С.Л. Обобщенная модель системы многоальтернативного управления [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2014): сб. тр. VII Междунар. конф. – Воронеж: Научная книга, 2014. – С. 280–282.

5. Подвальный, С.Л. Многоальтернативное управление в критических ситуациях [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Современные проблемы горно-металлургического комплекса: материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. – Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2014. – С. 289–294.

6. Подвальный, С.Л. Интеллектуальные системы многоальтернативного управления: принципы построения и пути реализации [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 996–1007.

7. Васильев, Е.М. Робастная стабилизация многомерных объектов в системах с переменной структурой [Текст] / Е.М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т.8, № 11. – С. 24–26.

8. Васильев, С.Н. Анализ динамики гибридных систем с помощью общих функций Ляпунова и множественных гомоморфизмов [Текст] / С.Н. Васильев, А.А.Косов // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. – С. 27–47.

9. Александров, А.Ю. Об устойчивости и стабилизации механических систем с переключениями [Текст] / А.Ю. Александров, А.А. Косов, Я. Чэнь // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. – С. 5–17.

10. Васильев, Е.М. Нечёткое управление структурно неустойчивыми объектами [Текст] / Е.М. Васильев, Д.М. Прокофьева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 10.1. – С. 8–12.

11. Пятницкий, Е.С. Принцип декомпозиции в управлении механическими системами [Текст] / Е.С.Пятницкий // Докл. АН СССР. – 1988. – Т.300, № 2. – С. 300–303.

12. Зубов, В.И. Математические методы исследования систем автоматического регулирования [Текст] / В.И. Зубов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 336 с.

Воронежский государственный технический университет

ANALYSIS OF THE STABILITY MULTIALTERNATIVE CONTROL SYSTEMS BASED ON THE DECOMPOSITION

S.L. Podvalny, E.M. Vasiljev

The problem of stabilization systems multialternative control on the example of the structural instability of the object. Based on the decomposition of the original model to the subsystem with a dedicated unchanging part defines a class of admissible controls to ensure stabilization in the specified arbitrary law of alternate switching

Key words: multialternative system, structural instability, decomposition, stabilization of objects

РАЗРАБОТКА КОНФИГУРАЦИИ УЧЕТА КОРРЕСПОНДЕНЦИИ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ 1С:ПРЕДПРИЯТИЕ 8

А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Э.Е. Прудников

В статье рассмотрен функционал разработанной конфигурации по учету корреспонденции

Ключевые слова: автоматизация учета, корреспонденция, отчетность, информационная база

Введение

Государственная фельдъегерская связь Российской Федерации обеспечивает оперативную доставку с гарантированной сохранностью отправлений особой важности, совершенно секретных, секретных и иных служебных отправлений [1].

На момент написания статьи в каждом крупном городе России располагаются отделы ГФС, через которые ежедневно проходят сотни (а в некоторых городах и тысячи) отправлений. В свете большого количества отделов по всей России и огромного количества корреспонденции, проходящей через эти отделы, встает вопрос об автоматизации учета всех отправлений. В большинстве отделов учет поставлен в «бумажном» виде. Сотрудники вручную описывают корреспонденцию, самостоятельно подготавливают документы для исходящих отправлений, в случае необходимости в ручном порядке формируют отчетность, что неблагоприятно сказывается на скорости и качестве работы отдела.

Постановка задачи

Для решения данных проблем предлагается использовать разработанную конфигурацию «1С:Управление корреспонденцией фельдъегерской службы».

При разработке конфигурации решались задачи:

- оперативного учета входящей и исходящей корреспонденции;
- автоматического расчета стоимости оказываемых услуг;
- автоматического формирования исходящих отправлений;
- обмена данными с конфигурацией «1С:Бухгалтерия государственного учреждения 8»;
- регистрации событий доступа к персональным данным;
- формирования различных форм отчетности;
- регистрации внешних пользователей и т.д.

Дополнительно ставилась цель уменьшить количество ошибок, совершаемых пользователем при составлении исходящей корреспонденции, и повышение продуктивности дежурной смены отдела за счет высвобождения времени при формировании исходящих отправлений.

Разработка конфигурации функционально была поделена на четыре модуля: «Корреспонденция», «Отчеты», «Обмен» и «Администрирование». Данные модули легли в основу построения командного интерфейса конфигурации.

Модуль «Корреспонденция» разрабатывался как основной, в котором собирается вся справочная информация и учетные документы. Весь учет данного модуля построен на двух основных документах и нескольких вспомогательных. Основными документами являются документ «Поступление корреспонденции» и документ «Расход корреспонденции», которые фиксируют приход и расход отправлений соответственно.

Поступление корреспонденции бывает трех видов:

- по реестру (от клиентов отдела ГФС);
- по описи (из других городов);
- возврат (в случае возврата отправления).

Особенностью вида «по реестру» является то, что для каждой поступившей корреспонденции должна быть определена стоимость доставки. Стоимость доставки определяется исходя из вида отправления (пакетная, грузовая), договора с клиентом и города получателя (т.е. территориальной удаленности). В договоре с контрагентом прописывается тарифный план, согласно которому будут оцениваться отправления. А стоимость тарифного плана устанавливается с учетом доставки по территориальным зонам. На момент написания статьи данных зон было восемь.

Идентификация клиента в документе происходит по двум параметрам – это контрагент и город. Данная связка реализована с целью упрощения ведения списка клиентов, т.к. практически в каждом городе России имеется отделение МФД, ФСБ, МЧС и др.

Стоимость доставки пакетной корреспонденции рассчитывается по следующим правилам, если вес пакета меньше стандартного (вес стандартного пакета устанавливается для каждого тарифного плана, по умолчанию 1 кг), то с клиента взимается стандартная плата за пакет

Барабанов Александр Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, ст. преподаватель, тел. (473) 243-77-18

Гребенникова Наталия Ивановна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 243-77-18

Прудников Эдуард Евгеньевич – ВГТУ, студент, e-mail: e.prudnikov@2drt.ru

согласно тарифу. Если вес пакета больше стандартного, то взимается двойная плата, не зависимо от того на сколько вес пакета превысил стандартный порог.

Стоимость доставки весовой корреспонденции рассчитывается за каждый килограмм, с округлением до целых в большую сторону.

Документы поступления с видом «по описи» или «возврат» не рассчитывают стоимость оказываемых услуг, а только фиксируют в базе факт поступления корреспонденции.

Реализация автоматизации учёта

Документ «Расход корреспонденции» бывает двух видов, формируемый по:

- городским маршрутам;
- междугородним маршрутам.

Данный документ спроектирован таким образом, чтобы максимально ускорить процесс формирования расхода, тем самым высвободив дополнительное время на обработку входящей корреспонденции сотрудниками отдела ГФС. Т.к. все данные о полученной корреспонденции в информационной базе уже имеются, заполнение данного документа полностью автоматическое. Для этого разработана специальная форма подбора корреспонденции, представленная на рисунке 1.

Рис. 1. Форма подбора корреспонденции

Подбор корреспонденции осуществляется как по одному параметру из формы подбора, так и по комбинации параметров, что позволяет гибко формировать требуемые маршруты. Из созданных документов реализована возможность печати сопроводительных документов.

При разработке алгоритма проведения документа «Расход корреспонденции» использовалась новая схема проведения документов, рекомендованная компанией 1С [2].

Модуль «Отчеты» разработан с целью объединения всех доступных печатных форм отчетности. Все отчеты текущего модуля разделены на три вида:

- ежедневные, которые формируются каждый день и используются всеми сотрудниками отдела;
- статистические, которые формируются по требованию и только руководящим составом отдела;
- служебные, предназначенные для получения служебной информации об информационной базе и формируются по мере необходимости.

Одним из ежедневных отчетов является отчет «Суточная ведомость», который анализирует остатки корреспонденции на начало и конец смены,

поступление и расход за смену с делением по видам поступлений (рисунок 2).

Модуль «Обмен» разработан для одной цели – выгрузки данных об оказанных услугах за период в конфигурацию «1С:Бухгалтерия государственного учреждения 8».

Обмен реализован с использованием COM-соединения к конфигурации-приемнику. При использовании COM-соединения в конфигурации задействуется модуль внешнего соединения, в котором обычно в типовых конфигурациях фирмы 1С реализовано незначительное количество процедур (около 3-4). В то время, когда при использовании механизма OLE задействуется модуль обычного приложения, в котором реализовано гораздо больше процедур и функций, тем самым замедляя процесс обмена [3-4].

← → ☆ Суточная ведомость (Форма №3)

На дату: 15.06.2015 [📅] [👉] Сформировать [🖨️]

ПОСТУПИЛО		ОТПРАВЛЕНО					
№ п/п	Виды поступления	Количество отправлений	Вес в кг.	№ п/п	Виды поступления	Количество отправл.	Вес в кг.
1	Остаток от предыдущего дня	4	1,65	1	По междугородним маршрутам	30	12,7
		1				7	
2	От обслуживаемых учреждений и организаций	79	36,95	2	По городским Маршрутам	7	1,65
		17				1	
3	С междугородних Маршрутов	7	2,4	3	В спецвазья	15	6,5
		2				3	
4	От спецвазья	10	4,5	4	Остаток на следующий день	48	24,65
		3				12	
Итого:		100	45,5	Итого:		100	45,5
		23				23	

Рис. 2. Отчет «Суточная ведомость»

Модуль «Администрирования» является самым большим по количеству собранных объектов конфигурации и предназначен исключительно для администраторов информационной базы. В данном модуле реализованы такие возможности как:

- журнал регистрации;
- активные пользователи;
- регламентные и фоновые задания;
- резервное копирование и восстановление;
- общие настройки базы;
- дополнительные реквизиты и сведения;
- защита персональных данных;
- и другие.

При разработке текущего модуля требовалось обеспечить соблюдение Федерального закона №152-ФЗ «О персональных данных». Т.к.

разработка велась на базе системы 1С:Предприятие 8, то оставалось обеспечить только гибкую настройку режим соответствия требованиям закона. Все остальные пункты закона реализованы непосредственно в самой технологической платформе.

Гибкость настройки режима соответствия закону достигается за счет:

- выделения областей персональных данных;
- управления «детальностью» регистрации событий.

Заключение

Пилотное тестирование конфигурации показало, что:

- у сотрудников увеличивается скорость обработки корреспонденции;
- уменьшается количество ошибок при подготовке исходящей корреспонденции;
- появляется возможность оперативно отслеживать движения и текущие остатки корреспонденции;
- появляется возможность формировать сложную статистическую отчетность за несколько минут.

Литература

1. Государственная фельдъегерская служба Российской Федерации [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: https://www.ru.wikipedia.org/wiki/Государственная_фельдъегерская_служба_Российской_Федерации
2. Ажеронок, В.А. Профессиональная разработка в системе «1С:Предприятие 8» [Текст] / В.А. Ажеронок, А.П. Габец, Д.И. Гончаров, Д.В. Козырев, Д.С. Кухлевский, А.В. Островерх, М.Г. Радченко, Е.Ю.

Хрусталева. – 2-е изд. – М.: ООО «1С-Паблишинг», 2012. – 1373 с.

3. Радченко, М.Г. Архитектура и работа с данными «1С:Предприятия 8.2» [Текст] / М.Г. Радченко, Е.Ю. Хрусталева. – М.: ООО «1С-Паблишинг», 2011. – 268 с.

4. Гончаров, Д.И. Технологии интеграции «1С:Предприятия 8.2» [Текст] / Д.И. Гончаров, Е.Ю. Хрусталева. – М.: ООО «1С-Паблишинг», 2011. – 358 с.

5. Barabanov, A.V. Structural modeling of continuous multi-center polymerization processes [Текст] / A.V. Barabanov, S.L. Podval'nyi // Automation and Remote Control. - 2012. V. 73. - № 7. - P. 1265-1268.

6. Тюрин, С.В. Способ тестопригодного проектирования логических преобразователей [Текст] / С.В.Тюрин, С. Л. Подвальный, Ю.С. Акинина // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). - 2010. - № 1. - С. 36-41.

7. Подвальный, С. Л. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации [Текст] / С. Л. Подвальный, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. Т. 9. - № 5.1. - С. 41-43.

8. Основы автоматизации проектирования, тестирования и управления жизненным циклом изделия [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин. - Воронеж, 2011.- 128 с.

9. Барабанов, В.Ф. Многовариантное моделирование динамических систем эволюционного типа для управления в экстремальных ситуациях [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, О.С. Плахотнюк / - Воронеж, 2007. – 128 с.

10. Акинин, Ю.Р. Использование ресурсов облачных вычислительных систем и мобильных агентов при решении задач мобильных технологий [Текст] / Ю.Р. Акинин, В.Н. Черников, В.Ф. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. Т. 9. - № 3-1. - С. 28- 34.

Воронежский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF CORRESPONDENCE ACCOUNTING CONFIGURATION BASED ON 1С:ENTERPRISE 8

V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, E.E. Prudnikov

The article describes the functionality of the developed configuration of accounting correspondence

Key words: automation of accounting, correspondence, reports, information base

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ АНАЛИЗА ТРАФИКА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ

Н.В. Белецкая, Ю.Т. Свиридов

Рассматривается подход к решению задачи классификации состояний телекоммуникационной сети на основе комбинированных нейросетевых моделей

Ключевые слова: трафик, сетевое соединение, классификация, рециркуляционная нейронная сеть, многослойный персептрон, алгоритмы обучения

Введение

Задача анализа сетевого трафика приобретает все большую актуальность в связи с развитием и внедрением новых сетевых технологий (и, как следствие, увеличением объема данных, передаваемых по сети), а также с появлением большого количества новых сетевых протоколов прикладного уровня. При анализе сетевого трафика решаются следующие основные задачи:

- выявление проблем в работе сети (в том числе, несанкционированной активности);
- восстановление потоков данных («прослушивание»);
- предотвращение различного рода сетевых атак;
- сбор статистики и определение характеристик сетевых соединений.

Одной из наиболее важных задач является обнаружение аномальных отклонений в состоянии сети, которые могут быть вызваны попытками несанкционированного доступа к сети. В статье рассматриваются методы решения данной задачи на основе нейросетевых технологий.

Постановка задачи

Пусть имеются n объектов I_1, \dots, I_n , представляющих собой сетевые соединения. Сетевое соединение - последовательность TCP пакетов за определенное время, в течение которого данные передаются от IP-адреса источника на IP-адрес приемника по некоторому протоколу. Также имеются L параметров P_1, \dots, P_L , характеризующих эти соединения. Параметры могут быть разделены на 3 следующих крупных класса:

1. Основные параметры (тип протокола, тип сервиса, число байт от источника к получателю и наоборот, флаг соединения и т.д.). Они могут быть извлечены из обычного TCP/IP соединения.

2. Параметры трафика. Они подсчитываются за определенный промежуток времени и представляют собой процент подключений к одному хосту/сервису за данный промежуток времени.

3. Содержательные параметры. С помощью анализа этих параметров выявляется «подозрительное» поведение соединения. Они включают число доступов типа root, число попыток создания файлов, число ошибочных попыток входа и другие [1].

Результат измерения i -й характеристики объекта I_j обозначим x_{ij} . Вектор $X_j = [x_{ij}]$ отвечает каждому ряду измерений (для j -го объекта). Таким образом, для множества I объектов задано множество векторов $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ измерений, которые описывают множество I . Множество X может быть представлено как n точек в L -мерном евклидовом пространстве E_L [2].

Совокупность значений L параметров могут быть представлены в виде матрицы X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{L1} & x_{L2} & \dots & x_{Ln} \end{bmatrix}$$

Рассмотрим множество K классов K_1, \dots, K_5 , характеризующих состояние сети:

- K_1 : Denial of Service Attack (DoS) – перегрузка ресурсов вычислительной сети до такой степени, когда «законные» попытки доступа отклоняются;

- K_2 : User to Root Attack (U2R) – попытка получить доступ к системе в режиме суперпользователя (root);

- K_3 : Remote to Local Attack (R2L) – попытка доступа к локальным ресурсам сети лица, не имеющего в ней аккаунта;

- K_4 : Probing Attack – разного рода наблюдение и зондирование;

- K_5 : Normal – функционирование сети в нормальном режиме [3].

Требуется определить принадлежность каждого из соединений I_1, \dots, I_n одному из классов K_1, \dots, K_5 на основе информации о значениях их параметров P_1, \dots, P_L , то есть построить отображение $\alpha: I \rightarrow K$, ставящее в соответствие соединению $I_j \in I$ определенный класс $K_s \in K, j = 1, \dots, n; s = 1, \dots, 5$.

Для решения данной задачи в статье используется нейросетевой подход.

Классификации состояний сети на основе комбинированных нейросетевых моделей

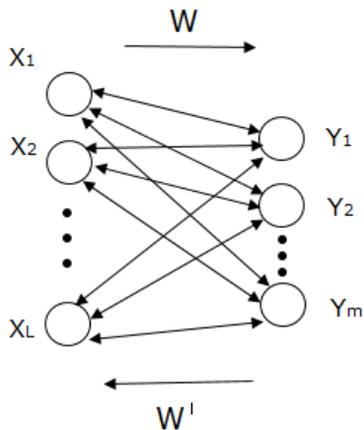
Основной трудностью при решении задачи классификации состояний телекоммуникационной сети является довольно высокая размерность пространства параметров P , характеризующих сетевые соединения. Это вызывает сильную вычислительную нагрузку на систему и, как следствие, увеличение времени отклика классификатора, что недопустимо при классификации аномальных отклонений в режиме реального времени. Поэтому, архитектуру нейронной сети целесообразно сделать комбинированной, и классификацию производить в 2 этапа:

1. Сжатие пространства признаков P_1, \dots, P_L до P'_1, \dots, P'_m , где $m < l$, с помощью рециркуляционной нейронной сети (RNN).

2. Определение принадлежности соединений X_1, \dots, X_n к классам K_1, \dots, K_5 на основе новых признаков P'_1, \dots, P'_m с помощью двухслойного перцептрона.

Рассмотрим технологию комбинированного нейросетевого моделирования.

Рециркуляционная нейронная сеть представляет собой сеть из двух слоев с двунаправленными связями. Ее архитектура представлена на рисунке:



Архитектура рециркуляционной нейронной сети (RNN)

Здесь W – матрица весов прямых связей, W' – матрица весов обратных связей. Можно отметить, что с помощью рециркуляционной сети можно как сжимать (кодировать) информацию, так и её декодировать, что обеспечивается двунаправленностью синаптических связей.

Покажем, что рециркуляционная сеть, обучение которой основано на анализе главных компонент (PCA), действительно осуществляет сжатие пространства признаков P_1, \dots, P_L без существенных потерь информации.

Рассмотрим матрицу измерений (1). Пусть $X_k = (X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kL})^T$ соответствует k -му входному образу, L – общее количество признаков.

Необходимо, чтобы математическое ожидание каждого X_k равнялось нулю. Этого можно добиться с помощью следующих преобразований:

$$x_{ij} = x_{ij} - \mu_j,$$

где μ_j – математическое ожидание по всем измерениям, определяемое следующим образом:

$$\mu_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{ij}$$

Матрица ковариаций векторов X_k имеет вид:

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1L} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{L1} & \sigma_{L2} & \dots & \sigma_{LL} \end{bmatrix}.$$

Элементы вычисляются следующим образом:

$$\sigma_{i,j} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \mu_i)(x_{jk} - \mu_j), \quad i, j = 1, \dots, L$$

Суть метода главных компонент заключается в отыскании линейных комбинаций входов нейронной сети x_1, x_2, \dots, x_L

$$\begin{cases} y_1 = \sum_{i=1}^L w_{1i} \cdot x_i \\ \dots \\ y_m = \sum_{i=1}^L w_{mi} \cdot x_i \end{cases},$$

где m – требуемое количество главных компонент, w_{ij} – весовые коэффициенты. Результирующие переменные y_1, y_2, \dots, y_m должны быть некоррелированы и выстроены по возрастанию дисперсии, а сумма дисперсий входных векторов должна остаться неизменной:

$$\sigma(y_i, y_j) = 0; \quad i, j = \overline{1, L},$$

$$\sigma(y_1) \geq \sigma(y_2) \geq \dots \geq \sigma(y_m),$$

$$\sum_i \sigma_{ii} = \sum_i \sigma(y_i).$$

Иными словами, матрица ковариаций S должна иметь диагональный вид. Это достигается в ортонормированном базисе, составленном из собственных векторов матрицы S q_1, \dots, q_L . Таким образом, задача об отыскании главных компонент сводится к задаче определения m наибольших собственных значений матрицы ковариаций и соответствующих им собственных векторов [4].

Покажем, что данную задачу анализа главных компонент можно решить с помощью нейронной сети, обучающейся по правилу обучения Хебба (с автоассоциативной памятью).

Рассмотрим простейшую нейронную модель, которая является линейной – единственный выход представляет собой линейную комбинацию входов

$$y = \sum_{j=1}^L w_j x_j$$

Согласно постулату Хебба, синаптический вес w_i изменяется во времени, сильно возрастая, если предсинаптический сигнал x_i и постсинаптический сигнал y совпадают друг с другом. В частности, можно записать следующее:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \eta y(n)x_i(n), i = 1, 2, \dots, m,$$

где n – дискретное время, η – параметр интенсивности обучения.

Чтобы избежать неограниченного возрастания синаптических весов, пронормируем выражение:

$$w_i(n+1) = \frac{w_i(n) + \eta y(n)x_i(n)}{\|v\|},$$

где

$$\|v\| = \left(\sum_{i=1}^m (w_i(n) + \eta y(n)x_i(n))^2 \right)^{1/2}$$

Данное выражение можно аппроксимировать следующим рядом первого порядка по η :

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \eta y(n)[x_i(n) - y(n)w_i(n)].$$

Таким образом, при перерасчете весов, к предыдущему весу прибавляется обычный Хеббовский модификатор и вычитается слагаемое, отвечающее за стабилизацию. Оно преобразует входной сигнал $x_i(n)$ к форме, зависящей от соответствующего синаптического веса $w_i(n)$ и выходного сигнала $y(n)$:

$$x'_i(n) = x_i(n) - y(n)w_i(n).$$

Будем называть этот вектор эффективным входом.

Столбцы матрицы весов $w_{i,j}(n)$ при $n \rightarrow \infty$ стремятся к собственным векторам матрицы корреляции S . Можно заметить, что один нейрон извлекает из входного сигнала первую главную компоненту, которая соответствует максимальному собственному значению ковариационной матрицы. Обобщая этот случай на m нейронов, можно заметить, что каждый последующий нейрон извлекает первую главную компоненту последующего эффективного входа x'_j , которая соответствует последующей главной компоненте входа x_j . Таким образом, с помощью m нейронов можно извлечь m главных компонент [5].

В обобщенном виде алгоритм обучения рециркуляционной сети можно представить следующим образом:

1. Проинициализировать веса w_{ij} случайными малыми значениями, определить параметр скорости

обучения η . Матрица обратных связей W' в процессе обучения по правилу Хебба не участвует.

2. Для $n = 1, j = 1, 2, \dots, L$ и $i = 1, 2, \dots, m$ вычислить:

$$y_j(n) = \sum_{i=1}^m w_{ji}(n)x_i(n),$$

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \left[y_j(n)x_i(n) - y_j(n) \sum_{k=1}^j w_{ki}(n)y_k(n) \right],$$

где $x_i(n)$ – i -ый элемент входного вектора $X(n)$ размерности $L \times 1$; m – требуемое число главных компонент.

3. Увеличить значение n на единицу, перейти к шагу 2 и продолжать до тех пор, пока синаптические веса w_{ji} не достигнут своих установившихся значений. Для больших n синаптические веса w_{ji} нейрона j сходятся к i -му компоненту собственного вектора, связанного с j -м собственным значением матрицы корреляции входного вектора $X(n)$.

Пройдя через рециркуляционную сеть, сжатые векторы $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_m)$ подаются на вход двух-слойного персептрона.

Количество нейронов скрытого слоя сделаем равным $2/3 \cdot m$ для избежания переобучения. На выходе сети имеем векторы $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$, где $k=5$ – количество классов, на принадлежность к которым исследуются сетевые соединения I_1, \dots, I_n . Компоненты выходного вектора можно представить в виде:

$$y_i(X) = \begin{cases} 1, & I \in K_i \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

В качестве функции активации выбрана сигмоидальная функция:

$$f(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}}$$

Обучение производится методом обратного распространения ошибки, который в сжатом виде можно записать следующим образом:

1. Инициализировать веса $w_{i,j}$ малыми случайными значениями;

2. Сети предъявляется входной вектор X_j и формируется выход Y_j . При этом нейроны последовательно от слоя к слою функционируют по следующим формулам:

скрытый слой:

$$X_j = \sum_i w_{i,j}x_i; y_j = f(x_j)$$

выходной слой:

$$X_k = \sum_j w_{j,k}y_j; y_k = f(x_k)$$

3. Квадратичная ошибка сети для данного входного образа имеет вид:

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (y_k - Y_k^\alpha)^2$$

Минимизация проводится методом градиентного спуска.

4. Подстройка весов скрытого слоя. Подстройка происходит по формуле:

$$w_{i,j}(t+1) = w_{i,j}(t) - h \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{i,j}}$$

5. Шаги 2-4 повторяются для всех входных образов, пока допустимая ошибка не примет достаточно малое значение, или не будет проведено максимально допустимое количество итераций [3].

Вычислительный эксперимент

Для сравнения эффективности рассмотренной комбинированной нейросетевой технологии со стандартными подходами был проведён вычислительный эксперимент. Его целью была проверка гипотезы о том, что сжатие размерности входных векторов X действительно не приводит к уменьшению точности классификации.

В качестве обучающей выборки для нейронных сетей были выбраны сигнатуры сетевых угроз из базы, собранной университетом MIT. Она содержит около 5 000 000 записей о сетевых соединениях, характеризующихся 41 признаком и распределённых по 4 классам аномальных отклонений (либо не относящихся к данным 4 классам, т.е. нормальных).

Тестирование проводилось на 10% обучающей выборки. При использовании комбинированной нейронной сети RNN+MLP проводилось сокращение количества входных признаков с 41 до 12.

Некоторые результаты эксперимента представлены в таблице:

Размер выборки	Тип сети	Пройдено тестов	Не пройдено тестов
1000	RNN+MLP	89	11
1000	MLP	92	8
5000	RNN+MLP	467	33
5000	MLP	470	30

Таким образом, можно видеть, что сокращение размерности пространства признаков сетевого трафика не приводит к значительному снижению точности распознавания. Поэтому его целесообразно использовать, особенно на больших выборках, для уменьшения вычислительных и временных затрат при классификации.

ффика не приводит к значительному снижению точности распознавания. Поэтому его целесообразно использовать, особенно на больших выборках, для уменьшения вычислительных и временных затрат при классификации.

Заключение

В работе рассмотрена задача классификации состояний телекоммуникационной сети. Для решения поставленной задачи был использован двухэтапный алгоритм, основанный на применении комбинированной нейросетевой модели, и проведено теоретическое обоснование целесообразности его использования. Разработанный алгоритм классификации позволяет снижать вычислительные затраты и повышать скорость распознавания за счёт сокращения размерности входных параметров без потери важной информации.

Система классификации, основанная на комбинированной нейросетевой модели, может быть интегрирована с существующими системами обнаружения угроз (IDS), или захватчиками сетевого трафика (Sniffers) посредством специальных PacketCapture (PCap) библиотек.

Литература

1. Емельянова, Ю.Г. Нейросетевая технология обнаружения сетевых атак на информационные ресурсы [Текст] / Ю.Г. Емельянова [и др.] // Программные системы: теория и приложения. – 2011. – №3(7). – С. 3-15.
2. Галушкин А. И. Нейронные сети [Текст] / А. И. Галушкин. – Горячая линия-Телеком, 2010. – 496 с.
3. Тарков М. С. Нейрокомпьютерные системы [Текст] / М. С. Тарков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2006. – 142 с.
4. Bryliuk D. Application of recirculation neural networks and principal component analysis for face recognition [Text] / D. Bryliuk, V. Starovoitov // The 2nd International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence, October 2-5, 2001, Minsk, Belarus. – P. 136-142.
5. Хайкин С. Нейронные сети [Текст]: полный курс: 2-е издание / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
6. Podval'ny, S.L. Intelligent modeling systems: design principles [Text] / S.L. Podval'ny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. - 2013. - Vol. 74. - № 7. - С. 1201-1210.

COMBINED NEURAL NETWORKS MODELS DEVELOPMENT IN APPLICATION TO TRAFFIC ANALYSIS IN TELECOMMUNICATION NETWORKS.

N.V. Beletckaiia, U.T. Sviridov

The approach to the solution of the telecommunication network states classification problem is under consideration. The considered solution to the problem is based on combined neural network technologies.

Key words: traffic, network connection, classification, recirculation neural network, multilayer perceptron, algorithms of learning

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЗЛАМИ КОНЕЧНОЙ ЕМКОСТИ И ЗАПРОСАМИ ИЗ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Хоанг Жанг, О.Я. Кравец

В статье анализируются стохастические сети, состоящие из узлов имеющих конечную емкость. В сети используются разные классы запросов, которые перемещаются в соответствии с некоторой политикой маршрутизации. Марковские процессы, описывающие эти сети, не имеют, в общем, свойства обратимости, следовательно явное выражение их распределений неизвестно. Режим сильной загрузки трафика определен: скорость прибытия запросов, так же как и емкость узлов пропорциональна коэффициенту, стремящемуся к бесконечности. Доказано, что в пределе связанный масштабируемый Марковский процесс сходится к детерминированной динамической системе, с уникальной точкой равновесия описываемой нестандартным методом неподвижной точки

Ключевые слова: стохастические сети, Марковские процессы, масштабирование

1. Введение

В статье предложен и рассмотрен новый вид стохастических сетей. Они динамически совмещают ключевые характеристики двух главных классов сетей массового обслуживания – сетей с потерями и сетей Джексона [4].

1. Каждый узел сети имеет конечную емкость, таким образом каждый запрос, попадающий в заполненный узел, отклоняется, как в сетях с потерями.

2. Запросы посещают подмножество узлов в соответствии с некоторым (возможным) случайным маршрутом, как в сетях Джексона или Келли [6].

2. Предшествующие результаты

В работе [5] получен ряд результатов и введены основные переменные.

Результаты определяют детерминированное поведение $\bar{X}^N(t)$ при $N \rightarrow \infty$ и являются следствием того факта, что стохастические возмущения исходной системы порядка \sqrt{N} и поэтому ими можно пренебречь из-за масштабирования $1/N$.

Для описания эволюции сети во времени вводится процесс N_{ξ}^p , означающий Пуассоновский процесс с параметром $\xi > 0$, процесс с верхним индексом $N_{\xi}^p, p \in \mathbb{N}^d, d \in \mathbb{N}$ вводится, когда нужно несколько таких Пуассоновских процессов. Пример: $N_{\lambda, q_r(i)}$ для $i \in I$ и $r \in R$ описывает Пуассоновский процесс поступления клиентов класса r в узел i . Аналогично, для $k \geq 1$ $N_{\gamma, p'(i,j)}^k$ - Пуассоновский процесс, связанный с перемещением k -го клиента класса r из узла i в узел $j \in I \cup \{0\}$.

Теорема 1. Если начальное состояние $\bar{X}^N(0)$ сходится к $x \in \chi_c$ при $N \rightarrow \infty$, то в топологии Скорохода [2] $\bar{X}^N(t)$ сходится к решению $x(t)$

следующего дифференциального уравнения: для $(i, r) \in I \times R$,

$$\frac{d}{dt} x_{i,r}(t) = \left(\lambda_r q_r(i) + \gamma_r \sum_j x_{j,r}(t) p^{(r)}(j, i) \right) \tau_i(x(t)) - (\gamma_r + \mu_r) x_{i,r}(t) \quad (1)$$

$$\text{при } x(0) = x \text{ и } \tau_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_r x_{i,r} < c_i, \\ \rho_x^i \wedge 1, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

где $a \wedge b = \min(a, b)$ для $a, b \in \mathbb{R}$ и

$$\rho_x^i = \frac{\sum_r (\gamma_r + \mu_r) x_{i,r}(t)}{\sum_r \left[\lambda_r q_r(i) + \gamma_r \sum_j x_{j,r}(t) p^{(r)}(j, i) \right]}$$

2. Точки равновесия

Теорема 1 показывает, что точки равновесия $x \in \chi_c$ ограниченной динамической системы, т.е. те x , которые удовлетворяют условию $x'_{i,r}(t) = 0$ для любых $(i, r) \in I \times R$ и $t \geq 0$, когда $(x_{i,r}(0)) = x$, являются решениями следующего набора уравнений:

$$(\gamma_r + \mu_r) x_{i,r} = \left(\lambda_r q_r(i) + \gamma_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j, i) \right) \tau_i(x), \quad (2)$$

$$\forall (i, r) \in I \times R,$$

где $\tau_i(x)$ имеет тот же смысл, что и в **Теореме 1**.

Отметим, что $\tau_i(x) \in (0, 1]$ и что $\tau_i(x) = 1$ или

$$\sum_r x_{i,r} = c_i.$$

2.1. Характеристики и существование точек равновесия

Если $x \in \chi_c$ удовлетворяет (2), то это - решение уравнений

$$(\gamma_r + \mu_r) x_{i,r} = \left(\lambda_r q_r(i) + \gamma_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j, i) \right) t_i, \quad (3)$$

$$\forall (i, r) \in I \times R$$

для некоторых $t = (t_i) \in (0, 1]^I$, таких что для любого

$$i \in I \text{ либо } t_i = 1 \text{ либо } \sum_r x_{i,r} = c_i.$$

Напротив, если $x \in \chi_c$ есть решение уравнения (3) для фиксированной $i \in I$, то возможны 2 случая:

• Если $\lambda_r q_r(i) + \gamma_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j,i) = 0$ для всех $r \in R$, то

$x_{i,r} = 0$ для всех r и таким образом, $\tau_i(x) = 1$ и уравнения (2) тривиальны.

• В противном случае, суммируя эти соотношения по $r \in R$, получаем тождество

$$\rho_x^i = \frac{\sum_r (\gamma_r + \mu_r) x_{i,r}}{\sum_r \left[\lambda_r q_r(i) + \gamma_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j,i) \right]}$$

Если $t_i = 1$, то $\rho_x^i = 1$ и таким образом, по определению $\tau_i(x)$, $\tau_i(x) = 1 = t_i$. Если $t_i < 1$, то в соответствии с предложенным выше, получим $\sum_r x_{i,r} = c_i$, таким образом

$$\tau_i(x) = \frac{\sum_r (\gamma_r + \mu_r) x_{i,r}}{\sum_r \left[\lambda_r q_r(i) + \gamma_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j,i) \right]} \wedge 1 = t_i$$

Таким образом, уравнения (2) удовлетворяют x .

Итак, получены следующие характеристики точек равновесия:

Утверждение 1 (Характеристика точек равновесия). Точки равновесия ограничивающей динамической системы есть элементы $x \in \chi_c$ такие, что существует некоторое $t \in (0, 1]^I$, удовлетворяющее следующим условиям:

1. Для любых $(i, r) \in I \times R$,

$$x_{i,r} = \left(\alpha_r q_r(i) + \beta_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j,i) \right) t_i. \quad (4)$$

2. Для любых $i \in I$, справедливо, что либо $t_i = 1$ либо $\sum_r x_{i,r} = c_i$,

где $\alpha_r = \lambda_r / (\gamma_r + \mu_r)$ и $\beta_r = \gamma_r / (\gamma_r + \mu_r)$ для $r \in R$.

Для доказательства существования неподвижной точки будет полезна вторая характеристика точки равновесия:

Утверждение 2 (Существование точки равновесия). Точки равновесия динамической системы (1) по теореме 1 есть неподвижные точки из χ_c для функции Φ_c , объявленной следующим образом для $x \in \chi_c$:

$$\Phi_c = \left(\Theta_c \left(\left(\alpha_r q_r(i) + \beta_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j,i), r \in R \right), i \in I \right), i \in I \right), \quad (5)$$

где для $z > 0$ и $u \in [0, +\infty)^R$,

$$\Theta_z(u) = \left(\frac{z}{\sum_r u_r} \wedge 1 \right) u$$

Функция Φ_c имеет по крайней мере одну неподвижную точку.

Доказательство. Напомним, что функция Θ_c отображает $[0, +\infty)^R$ в подмножество

$$\left\{ u \in [0, +\infty)^R : \sum_r u_r \leq c \right\}$$

и на самом деле $\Phi_c(x)$ принадлежит к χ_c : ее (i, r) -е координаты равны 0 всегда, когда $i \notin I_r$.

Характеристики точек равновесия следуют из утверждения 1, и отмечая, что для $u \in [0, +\infty)^R$, $z > 0$ и $v \in [0, +\infty)^R$ таких, что $\sum_r u_r \leq z$, можно

сказать, что тождество $\Theta_z(u) = v$ эквивалентно тому факту, что существует некоторое $t \in (0, 1]$ такое, что $v = tu$ и либо $t = 1$, либо $\sum_r u_r = z$.

Тогда существование неподвижной точки является следствием теоремы Брауэра [1] о неподвижной точке, т.к. χ_c есть выпуклое компактное подмножество $R^{I \times R}$ и Φ_c есть непрерывная функция от χ_c на себе.

2.2. Пример детерминированных маршрутов

Запросы класса r используют детерминированные маршруты длиной $L \in N \cup \{+\infty\}$, состоящие из очередей $I_r = (i_p, 0 \leq p < L)$ со значениями в I такими, что

$q_r(i_0) = 1$, $p^{(r)}(i_p, i_{p+1}) = 1$ для $0 \leq p < L$ и $p^{(r)}(i_{L-1}, 0) = 1$, при $L < +\infty$. Отметим, что так как I конечно, случай $L = +\infty$ обязательно соответствует маршруту r , который в итоге становится периодическим. Точки равновесия, описанные в

Утверждении 1, могут быть подробно записаны исходя из решения (4)

$$x_{i,r} = \left(\alpha_r q_r(i) + \beta_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j,i) \right) t_i \quad \text{следующим}$$

образом:

1. Для непериодического детерминированного маршрута с $L < +\infty$ эти уравнения сводятся к рекурсии - для $0 \leq p < L$,

$$x_{i_p,r} = \alpha_r \beta_r^p \prod_{k=0}^p t_{i_k}$$

2. Для периодического маршрута r , состоящего из узлов i_0, i_1, \dots, i_{k-1} и затем бесконечного цикла $i_k, i_{k+1}, \dots, i_{k+1}, i_k, i_{k+1}, \dots$ эти уравнения имеют решение, только если $\beta_r^1 t_{i_k} \dots t_{i_{k+1}} < 1$. И в этом случае

$$x_{i,h,r} = \alpha_r \beta_r^h \prod_{m=0}^h t_{i,m}, \quad 0 \leq h \leq k-1, \quad (6)$$

$$x_{i,h,r} = \frac{\alpha_r \beta_r^h \prod_{m=0}^h t_{i,m}}{1 - \beta_r^k \prod_{m=k}^l t_{i,m}}, \quad h \geq k.$$

Приведенные выше вычисления показывают, что точка $(x_{i,r})$ имеет в $t=(t_j)$ полиномиальное выражение, порядок которого связан с местом, занимаемым узлом i в маршруте – в случае неперидического маршрута, и что $(x_{i,r})$ задается степенным рядом от t , когда маршрут r периодический. Кроме того, эти величины должны удовлетворять следующим ограничениям: для $i \in I$, либо $t_i=1$, либо $\sum_r x_{i,r} = c_i$. Точное выражение для

неподвижных точек в случае детерминированных маршрутов, по всей видимости, получить будет сложно. Как будет показано далее, даже определение единственности – непростая задача.

Сложность точных выражений показана на примере простой сети с двумя узлами, $I=\{1,2\}$, и двумя детерминированными неперидическими маршрутами: вызовы первого класса поступают в узел 1, следуют в узел 2 и затем покидают сеть, тогда как вызовы класса 2 делают то же самое, но наоборот. Возьмем $\mu_1 = \mu_2 = 0$ такие, что $\beta_1 = \beta_2 = 1$. Тогда легко показать, что:

1. Точка равновесия, ассоциированная с (t_1, t_2) при условии $t_1=t_2=1$ существует только тогда, когда $\alpha_1 + \alpha_2 \leq c_1$ и $\alpha_1 + \alpha_2 \leq c_2$. В этом случае, $x_{1,1} = x_{2,1} = \alpha_1$ и $x_{1,2} = x_{2,2} = \alpha_2$.

2. Точка равновесия существует при $t_1=1$ и $t_2 < 1$, только если

$$\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} c_2 \leq c_1 \text{ и } \alpha_1 + \alpha_2 > c_2.$$

И она будет уникальна при условии:

$$x_{1,1} = \alpha_1, \quad x_{2,1} = \alpha_1 \frac{c_2}{\alpha_1 + \alpha_2},$$

$$x_{1,2} = x_{2,2} = \alpha_2 \frac{c_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

3. Симметрично, аналогичный результат получим при $t_1 = 1$ и $t_2 < 1$

4. Точка равновесия существует при $t_1 < 1$ и $t_2 < 1$ только если

$$\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} c_2 > c_1 \text{ и } \alpha_2 + \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} c_1 > c_2.$$

В этом случае она уникальна при условии:

$$x_{1,1} = \alpha_1 t_1, \quad x_{1,2} = \alpha_2 t_1 t_2, \quad x_{2,1} = \alpha_1 t_1 t_2, \quad x_{2,2} = \alpha_2 t_2,$$

и

$$t_1 = \frac{(\alpha_1 c_1 - \alpha_2 c_2 - \alpha_1 \alpha_2) + \sqrt{(\alpha_1 c_1 - \alpha_2 c_2 - \alpha_1 \alpha_2)^2 + 4 \alpha_2 c_1 \alpha_1^2}}{\alpha_1^2},$$

причем t_2 имеет аналогичное выражение с нижними индексами 1, замененными на 2 и наоборот.

Несложно убедиться, что эти 4 случая не пересекаются и покрывают все возможные

ситуации. Таким образом, уникальность точки равновесия имеет место в данном случае.

Аналогичный подход не представляется возможным для более сложной системы детерминированных маршрутов. Даже доказательство единственности в этом случае является сложной задачей.

2.3. Уникальность точек равновесия

В силу утверждения 2, для доказательства уникальности точки равновесия будет достаточно свойства сжатия для Φ_c . Но можно показать, что в общем случае Φ_c не обладает свойством сжатия классических норм.

Для примера, в простой сети, рассмотренной выше, с параметрами $\beta_1 = \beta_2 = 1$, уравнение $\Phi_c(x) = y$ есть

$$(y_{1,1}, y_{1,2}) = \Theta_{c_1}(\alpha_1, x_{2,2}) \text{ и } (y_{2,1}, y_{2,2}) = \Theta_{c_2}(x_{1,1}, \alpha_2).$$

Когда $c_1 > \alpha_1$ и $c_2 > \alpha_2$, можно выбрать x и x' из χ_c такие, что

$$\begin{cases} \alpha_1 + x_{2,2} \leq c_1, \alpha_1 + x'_{2,2} \leq c_1 \\ \alpha_2 + x_{1,1} \leq c_2, \alpha_2 + x'_{1,1} \leq c_2 \\ x_{1,2} = x'_{1,2}, x_{2,1} = x'_{2,1} \end{cases}$$

тогда в этом случае

$$\|\Phi_c(x) - \Phi_c(x')\|_p = \|x - x'\|_p \text{ для } p \in [1, +\infty),$$

где $\|x\|_p$ - это L_p -норма [3] $(\|x\|_p)^p = \sum_{i,r} |x_{i,r}|^p$ для

$$p < +\infty \text{ и } \|x\|_\infty = \max \{ |x_{i,r}| : (i,r) \in I \times R \}.$$

При условии, что $\max\{\beta_r : r \in R\} < 1$ и в случае детерминированного неперидического маршрута, функция

$$x \rightarrow \left(\alpha_r q_r(i) + \beta_r \sum_j x_{j,r} p^{(r)}(j,i), \quad (i,r) \in I \times R \right)_i$$

есть сжатие для любой L_p -нормы. Тем не менее, это же свойство обязательно выполняется для Φ_c , так как может быть показано, что функция Θ_c , $c > 0$, не является сжатием для любой L_p -нормы на $[0, +\infty)^R$, за исключением случаев, когда $|R| = 1$, или когда $|R| = 2$ и $p = +\infty$.

2.4. Двойственный подход

Для доказательства уникальности в общем случае, нужно изменить подход к рассмотрению системы — вместо того, чтобы искать такую точку $x \in \chi_c$, которая является точкой равновесия ограничивающей динамической системы, связанной с заданными вектором $c=(c_i, i \in I) \in (0, +\infty)^I$ емкостей, задается элемент x , и ищется такой набор векторов s , чтобы данный x являлся точкой равновесия ограничивающей динамической системы. Уникальность точки равновесия для заданного набора s есть эквивалентность такому свойству этого набора, что векторы, ассоциированные с двумя различными значениями x , не пересекаются. Определим

$$\chi_\infty \square \{x \in [0, +\infty)^{I \times R} : x_{i,r} = 0 \text{ при } i \notin I_r\}.$$

Конечно, этого достаточно, чтобы рассмотреть такие x из χ_∞ , которые удовлетворяют (4) для некоторых $t \in (0, 1]^I$. В первую очередь, нужно показать, что для любых $t \in (0, 1]^I$, решение x системы уравнений (4) единственно.

Утверждение 3 (Вероятностное представление). *Если $t \in (0, 1]^I$ таково, что система уравнений (4) имеет решение χ_∞ , то это решение единственно и может быть представлено как*

$$x_{i,r}^t = \alpha_r E \left(\sum_{k=0}^{+\infty} \beta_r^k \prod_{p=0}^k t_{Z_p^{(r)}} L_{\{Z_k^{(r)}=i\}} \right) \quad \forall (i,r) \in I \times R, \quad (7)$$

где $(Z_n^{(r)})$ есть Марковская цепь с матрицей переходов $p^{(r)}(\cdot, \cdot)$ и начальным распределением q_r .

Отметим, что приведенное выше выражение $(x_{i,r})$ обобщает формулу, полученную для периодических детерминированных Марковских маршрутов. Используя похожую систему обозначений (как в примере с периодическими детерминированными маршрутами) из уравнения (7) получим

для $h \geq k$

$$x_{i_h} = \alpha_r \beta_r^h \prod_{f=0}^h t_{i_f} \sum_{j=0}^{+\infty} \left(\beta_r^j \prod_{f=k}^{k+j-1} t_{i_f} \right) = \frac{\alpha_r \beta_r^h \prod_{f=0}^h t_{i_f}}{1 - \beta_r^j \prod_{f=k}^{k+j-1} t_{i_f}},$$

что соответствует (6), и для $h < k$ $x_{i_h} = \alpha_r \beta_r^h \prod_{f=0}^h t_{i_f}$.

Доказательство Утверждения 3. Система уравнений (11) разделяется на $|R|$ подсистем уравнений (каждая для своего $r \in R$) с неизвестными $x_{i,r}$, $i \in I_r$. Рассмотрим одну систему уравнений из $|R|$ и для упрощения опустим индекс r . Обозначим через J диапазон из I Марковской цепи (Z_k) с начальным распределением q и матрицей переходов $p(\cdot, \cdot)$. Такая подсистема уравнений может быть представлена следующим образом:

$$x_i = \left(\alpha q(i) + \beta \sum_j x_j p(j,i) \right) t_i, \quad i \in J.$$

Эта система уравнений имеет решение в связи с тем, что система уравнений (4) также его имеет для $i \in J$. Положим $y_i = \frac{x_i}{\alpha t_i}$ (напомним, что α и t_i -

положительны). Тогда вектор $y = (y_i)$ является решением уравнений

$$y_i = q(i) + \beta \sum_j y_j \tilde{P}(j,i), \quad i \in J, \quad (8)$$

при условии, что $\tilde{P}(j,i) = \beta t_j p(j,i)$. Матрица $\tilde{P} = (\tilde{P}(j,i))$ субМарковская и (\tilde{Z}_n) обозначает Марковскую цепь с начальным распределением $(q(i))$ и матрицей переходов \tilde{P} . Очевидно, что для $i \in J$ выполнено $y_i \geq q(i) = P(\tilde{Z}_0 = i)$, и с использованием индукции получим следующее: для $n \geq 1$

$$y_i \geq E(L_{\{\tilde{Z}_0=i\}} + L_{\{\tilde{Z}_1=i\}} + \dots + L_{\{\tilde{Z}_n=i\}}).$$

Предполагая, что $n \rightarrow \infty$, получим

$$y_i \geq u_i \square E \left(\sum_{k=0}^{+\infty} L_{\{\tilde{Z}_k=i\}} \right) \quad \forall i \in J.$$

Для любых $i \in J$ приведенное выше неравенство означает, что

$$\sum_{k=0}^{+\infty} \tilde{P}^k(i,i) < +\infty,$$

что приводит к выводу, что состояние i является переходным для Марковской цепи (\tilde{Z}_n) .

Легко проверить, что (u_i) также является решением (8). Следовательно, неотрицательный вектор $(v_i) = (y_i - u_i)$ удовлетворяет уравнению

$$v_i = \sum_j v_j \tilde{P}(j,i), \quad i \in J,$$

что является уравнением инвариантной меры для этой Марковской цепи. Так как все состояния являются временными, мы получаем $v_i = 0$ для всех $i \in J$. Таким образом, уникальность доказана. Легко проверить, что представление (x_i) в терминах Марковской цепи (Z_n) , на самом деле задано представлением (u_i) в терминах Марковской цепи (\tilde{Z}_n) . Таким образом, утверждение доказано.

Определение. Множество \mathfrak{Z} есть такое подмножество $t \in (0, 1]^I$, что система уравнений (4) имеет решение, обозначенное как $x^t = (x_{i,r}^t)$ и уникальное в соответствии с приведенным выше утверждением. Для $t \in \mathfrak{Z}$ и $i \in I$, определим

$$\sigma_i(t) = \sum_r x_{i,r}^t = \sum_r \alpha_r E \left(\sum_{k=0}^{+\infty} \beta_r^k \prod_{p=0}^k t_{Z_p^{(r)}} L_{\{Z_k^{(r)}=i\}} \right),$$

где $(Z_n^{(r)})$, как и ранее - Марковская цепь с матрицей переходов $p^{(r)}(\cdot, \cdot)$ начальным распределением q_r .

Лемма 1 (Сильная монотонность). Если $t = (t_i)$ и $t' = (t'_i)$ есть элементы из \mathfrak{Z} такие, что для любых $i \in I$ $t_i < t'_i \Rightarrow \sigma_i(t) \geq \sigma_i(t')$ и $t'_i < t_i \Rightarrow \sigma_i(t') \geq \sigma_i(t)$,

то $t = t'$.

Доказательство. Из предположения о t и t' получаем:

$$\sum_{i \in I} \log \left(\frac{t'_i}{t_i} \right) (\sigma_i(t') - \sigma_i(t)) \leq 0. \quad (9)$$

Из определения σ_i получим следующее представление разности $\sigma_i(t') - \sigma_i(t)$:

$$\sigma_i(t') - \sigma_i(t) = \sum_r \alpha_r E \left(\sum_{k=0}^{+\infty} \beta_r^k \left(\prod_{h=0}^k t'_{Z_h^{(r)}} - \prod_{h=0}^k t_{Z_h^{(r)}} \right) L_{\{Z_k^{(r)}=i\}} \right).$$

Обратим внимание, что как и в доказательстве Утверждения 3, бесконечные суммы интегрируемы в допустимых пределах, что позволяет выполнить эти алгебраические операции. Подставив это выражение в (9) и заменяя суммы, сначала для $i \in I$ и $r \in R$, и затем для $i \in I$ и $k \in \mathbb{N}$ (напомним, что I и R конечны), получим

$$\sum_r \alpha_r E \left(\sum_{k=0}^{+\infty} \beta_r^k \log \left(\frac{t'_{Z_k^{(r)}}}{t_{Z_k^{(r)}}} \right) \left(\prod_{h=0}^k t'_{Z_h^{(r)}} - \prod_{h=0}^k t_{Z_h^{(r)}} \right) L_{\{Z_k^{(r)} \neq 0\}} \right) \leq 0$$

Расширив определения t и t' для координаты 0 таким образом, что $t_0=t'_0=1$, получим

$$\sum_r \frac{\alpha_r}{\beta_r} E \left(\sum_{k=0}^{+\infty} \beta_r^k \log \left(\frac{\beta_r t'_{z_k(r)}}{\beta_r t_{z_k(r)}} \right) \left(\prod_{h=0}^k \beta_r t'_{z_h(r)} - \prod_{h=0}^k \beta_r t_{z_h(r)} \right) \right) \leq 0.$$

Утверждение 4 (далее), примененное к выражению выше, доказывает, что с вероятностью 1 подынтегральное выражение равно 0. Следовательно, исходя из аналогичного предположения, получим, что для любого $r \in R$ тождество $t_{z_k(r)} = t'_{z_k(r)}$ выполняется почти всегда для любых $k \in N$. Таким образом, по определению I_r , $t_i = t'_i$ для любых $i \in I_r$ и $r \in R$. Следовательно $t=t'$, так как $I = \bigcup_r I_r$. Таким образом, лемма доказана.

Теперь можно получить основной результат, касающийся точек равновесия ограничивающей динамической системы (5).

Теорема 2 (Уникальность точек равновесия). Существует уникальная точка равновесия динамической системы $(x_{i,r}^t(t), (i,r) \in I \times R)$, определяемой выражением (1).

Доказательство. Для $t \in \mathfrak{Z}$ обозначим через C_t множество векторов $c = (c_i) \in (0, +\infty]^I$ таких, что x^t - неподвижная точка динамической системы, связанная с емкостями (c_i) . Для $t \in \mathfrak{Z}$ и $c \in (0, +\infty]^I$, **Утверждение 1** показывает, что если $c \in C_t$, то $\forall i \in I \Rightarrow \sigma_i(t) \leq c_i$, и если $t_i < 1$, то $\sigma_i(t) = c_i$.

Для $t, t' \in \mathfrak{Z}$ предположим, что существует некоторая величина $c \in C_t \cap C_{t'}$. Если $i \in I$, соотношение $t_i < t'_i$ означает, что $t_i < 1$ и следовательно, что $\sigma_i(t') \leq \sigma_i(t) = c_i$. Из **Леммы 1** следует, что обязательно $t=t'$. Уникальность точек равновесия следует из того, что если z и z' есть точки равновесия динамической системы (1), связанной с некоторым вектором емкостей $c \in (0, +\infty]^I$, то существуют t и $t' \in \mathfrak{Z}$ такие, что $z = x^t$ и $z' = x^{t'}$. Так как $c \in C_t \cap C_{t'}$, мы получаем $t = t'$ и следовательно $z = z'$. Таким образом, теорема доказана.

3. Важные технические результаты

Этот раздел посвящен доказательству ключевых технических результатов, использованных для доказательства уникальности точек равновесия. Он включает в себя выражение, которое имеет некоторое сходство с выражением относительной энтропии.

Утверждение 4. Пусть $u = (u_i)_{i \in N}$ и $u' = (u'_i)_{i \in N}$ - две последовательности элементов $(0, 1]$. Если ряд

$$\sum_{i=0}^{+\infty} \log \frac{u'_i}{u_i} \left(\prod_{j<i} u'_j - \prod_{j<i} u_j \right)$$

сходится, то его сумма неотрицательна и она равна 0 только если $u = u'$.

Доказательство. Методом математической индукции докажем для $n \in N$, что для любых $u, u' \in (0, 1]^n$

$$f_n(u, u') \square \sum_{i=0}^{+\infty} \log \frac{u'_i}{u_i} \left(\prod_{j<i} u'_j - \prod_{j<i} u_j \right) \geq 0. \quad (10)$$

Очевидно, что это верно для $n=0$. Теперь предположим, что это неравенство справедливо для любого целого числа $k < n$. Пусть u и u' будут некоторыми элементами из $(0, 1]^n$.

• Если существует некоторое k такое, что $1 \leq k \leq n$ и

$$\left(\prod_{j \leq k-1} u'_j - \prod_{j \leq k-1} u_j \right) \left(\prod_{j \leq k} u'_j - \prod_{j \leq k} u_j \right) \leq 0,$$

то $f_n(u, u')$ может быть представлено следующим образом:

$$f_n(u, u') = f_{k-1}((u_0, \dots, u_{k-1}), (u'_0, \dots, u'_{k-1})) + f_{n-k} \left(\prod_{j \leq k} u_j, u_{k+1}, \dots, u_n, \prod_{j \leq k} u'_j, u'_{k+1}, \dots, u'_n \right) - \log \frac{\prod_{j \leq k-1} u'_j}{\prod_{j \leq k-1} u_j} \left(\prod_{j \leq k} u'_j - \prod_{j \leq k} u_j \right). \quad (11)$$

Из предположения об индукции и о k , все члены в правой части этого тождества неотрицательны, таким образом $f_n(u, u') \geq 0$.

• В противном случае, для любого $0 \leq k \leq n$, величина $\prod_{j \leq k} u'_j - \prod_{j \leq k} u_j$ имеет постоянный знак и не

равна 0 (положительна). Возможны 2 случая:

1. Если $u_k \leq u'_k$ для всех k , таких что $0 \leq k \leq n$, все члены суммы, определяющей $f_n(u, u')$ неотрицательны, и следовательно $f_n(u, u') \geq 0$.

2. Иначе, пусть $k \leq n$ будет первым индексом, таким, что $u_k > u'_k$. Так как $u_0 < u'_0$, то, $k \geq 1$ и можно написать:

$$f_n(u, u') = f_{n-1}[(u_0, \dots, u_{k-2}, u_{k-1}, u_{k+1}, \dots, u_n), (u'_0, \dots, u'_{k-2}, u'_{k-1}, u'_{k+1}, \dots, u'_n)] + \log \frac{u'_{k-1}}{u_{k-1}} \left((1-u'_k) \prod_{j \leq k-1} u'_j - (1-u_k) \prod_{j \leq k-1} u_j \right).$$

Исходя из гипотезы индукции, первый член неотрицательный. Второй член также неотрицательный, т. к. $u_{k-1} \leq u'_{k-1}$, $u'_k \leq u_k$ и

$$\prod_{j \leq k-1} u_j \leq \prod_{j \leq k-1} u'_j.$$

Следовательно, в этом случае всегда справедливо $f_n(u, u') \geq 0$.

Неравенство (10), таким образом, справедливо для любых $n \in N$, и подразумевает, что для любых $u, u' \in (0, 1]^N$

$$f_\infty(u, u') \square \sum_{i=0}^{+\infty} \log \frac{u'_i}{u_i} \left(\prod_{j<i} u'_j - \prod_{j<i} u_j \right) \geq 0$$

когда бы сумма не сходилась. Первая часть утверждения доказана.

Предположим теперь, что $f_\infty(u, u') = 0$ для некоторых $u, u' \in (0, 1]^N$, таких, что ряд сходится. Используя вид разбиения, похожий на представленный в уравнении (A.2), $f_\infty(u, u')$ для некоторых фиксированных $k \geq 1$ может быть представлена следующим образом:

$$f_{\infty}(u, u') = f_{k-1}((u_0, \dots, u_{k-1}), (u'_0, \dots, u'_{k-1})) + \\ + f_{\infty}\left(\prod_{j \leq k} u_j, u_{k+1}, \dots\right) \left(\prod_{j \leq k} u'_j, u'_{k+1}, \dots\right) - \log \frac{\prod_{j \leq k-1} u'_j}{\prod_{j \leq k-1} u_j} \left(\prod_{j \leq k} u'_j - \prod_{j \leq k} u_j\right) = 0.$$

Ясно, что второй член в выражении справа от знака равенства есть $f_{\infty}(u, u')$. Если первый и второй члены неотрицательны, получим

$$\log \frac{\prod_{j \leq k-1} u'_j}{\prod_{j \leq k-1} u_j} \left(\prod_{j \leq k} u'_j - \prod_{j \leq k} u_j\right) \geq 0.$$

Следовательно, разность $u'_0 u'_1 \dots u'_k - u_0 u_1 \dots u_k$ имеет постоянный знак для любых $k \in \mathbb{N}$. Можно предположить, что эти выражения неотрицательны:

1. Если $u_i \leq u'_i$ выполнено для любых $i \geq 0$, то каждый член бесконечной суммы, определяющей $f_{\infty}(u, u')$ неотрицателен и поэтому равен 0, так как $f_{\infty}(u, u') = 0$. Из этого следует, что $u_i = u'_i$ для всех $i \in \mathbb{N}$.

2. В противном случае, учитывая $u_0 \leq u'_0$, обозначим через $n \geq 1$ наименьшее целое число такое, что $u_n > u'_n$. Так как $u'_0 u'_1 \dots u'_n < u_0 u_1 \dots u_n$, существует некоторый индекс $i < n$, удовлетворяющий условию $u_i \leq u'_i$. Обозначим через k наибольший такой индекс. В частности, для $k < i < n$, получим $u_i = u'_i$. Таким образом,

$$f_{\infty}(u, u') = f_{\infty}((u_0, \dots, u_{k-1}, \prod_{k \leq j \leq n} u_j, u_{n+1}, \dots), (u'_0, \dots, u'_{k-1}, \prod_{k \leq j \leq n} u'_j, u'_{n+1}, \dots)) + \\ + \log \frac{u'_k}{u_k} \left((1 - \prod_{k \leq j \leq n} u'_j) \prod_{j \leq k} u'_j - (1 - \prod_{k \leq j \leq n} u_j) \prod_{j \leq k} u_j \right) = 0.$$

Первый член неотрицателен и легко проверить, используя определения k и n , что второй член положителен. Таким образом, это равенство не имеет смысла. Второй случай невозможен. Таким образом, утверждение доказано.

Литература

1. Rosenlicht, M. Introduction to Analysis [Text] / M. Rosenlicht // New York: Dover, 1968. - 170 p.
2. Колесников, А.В. О топологических свойствах пространства Скорохода [Текст] / А.В. Колесников // ТВП. - 1998. - № 43:4. - С. 781–786.
3. Колмогоров, А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа [Текст] / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин // М.: Наука, 1976. - 544 с.
4. Матальцкий, М.А. Анализ и применения систем и сетей массового обслуживания [Текст] / М.А. Матальцкий, О.М. Тихоненко, Е.В. Косарева // Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2013.
5. Хоанг Жанг. Исследование стохастических сетей, состоящих из узлов конечной емкости, на основе масштабируемых Марковских процессов [Текст] / Хоанг Жанг, О.Я. Кравец // Информационные технологии моделирования и управления. – 2015. - №2(92). - С. 119–129.
6. Ховард, Р. Динамическое программирование и марковские процессы [Текст] // М.: Сов. радио, 1964.

Воронежский государственный технический университет

RESEARCH OF STOCHASTIC NETWORKS WITH NODES OF FINITE CAPACITY AND REQUESTS FROM DIFFERENT CLASSES

Hoang Zhang, O.Ja. Kravets

In article the stochastic networks consisting of the nodes having finite capacity are analyzed. On a network different classes of requests which move according to some policy of routing are used. The Markov processes describing these networks have, generally, no property of reversibility, therefore explicit expression of their distributions isn't known. The mode of the strong loading of traffic is defined: speed of arrival of requests as well as the capacity of nodes is proportional to the coefficient aiming at infinity. It is proved that in a limit the connected scalable Markov process meets to the determined dynamic system, with unique equilibrium point described not by a standard method of a fixed point

Key words: stochastic networks, Markov processes, scaling

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧЕРЕДИ М/М/1 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛАСТИЧНОГО ПОТОКА ДАННЫХ ПРИ МЕЖМОДУЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Нгуен Тхоай Ань, О.Я. Кравец

В статье рассматриваются очереди М/М/1 с изменяющейся интенсивностью обслуживания. Проблема, рассматриваемая в работе – определение количественных характеристик, описывающих влияние неэластичного трафика на эластичный

Ключевые слова: интенсивность обслуживания, эластичный трафик, случайное окружение

1. Введение

В статье рассматриваются очереди М/М/1 с изменяющейся интенсивностью обслуживания. Сделано предположение о том, что интенсивность обслуживания зависит от случайного окружения, представленного посредством некоторого процесса $X(t)$, который берет свои значения из некоторого (дискретного или непрерывного) пространства состояний и предполагается, что этот процесс стационарен. Изучение этих систем с очередями мотивировано рядом инженерных проблем.

Рассмотрим линию передачи телекоммуникационной сети, передающей трафик, который может адаптироваться к уровню загрузки сети (эластичный трафик) и небольшое количество трафика, который неустойчив к задержкам сети (неэластичный трафик). Проблема, рассматриваемая в работе – определение количественных характеристик, описывающих влияние неэластичного трафика на эластичный.

В реальности, эластичный трафик контролируется так называемым протоколом управления передачей (TCP), который был разработан для того, чтобы добиться равномерного распределения полос пропускания между достаточно длинными потоками при прохождении ими узких каналов связи. Если предположить, что рассматриваемый канал связи является узким (например, канал доступа к сети), то разумно предположить, что пропускная способность распределяется между различными конкурирующими потоками эластичного трафика в соответствии с дисциплиной разделения обслуживающего устройства (для примера см. [7, 14]). Тогда неэластичный трафик состоит из небольших передач данных, которые слишком малы, чтобы адаптироваться к уровню загрузки сети (см. современные исследования [4, 5, 9, 12, 13]). В работе будем считать, что длинные потоки трафика прибывают в соответствии с Пуассоновским процессом.

В соответствии с приведенными выше предположениями, воздействие неэластичного трафика на эластичный выглядит как некоторые

небольшие возмущения доступной полосы пропускания.

Кроме того, когда неэластичный трафик отсутствует, в соответствии со свойством нечувствительности очереди с разделением обрабатывающего устройства М/Г/1, количество длинных потоков идентично числу клиентов в очереди М/М/1. Таким образом, для того, чтобы описать поведение длинных потоков в случае неэластичного трафика, рассмотрим очередь М/М/1 со интенсивностью обслуживания, изменяющейся в зависимости от количества неэластичного трафика (например, может изменяться число маленьких потоков и их полосы пропускания). Проблема тогда состоит в том, чтобы оценить влияние неэластичного трафика на производительность системы. Например, классической проблемой является исследование обоснованности, так называемой аппроксимации сокращенного времени обслуживания (RSR), которая основывается на том предположении, что интенсивность обслуживания длинных потоков данных снижается при средней загрузке неэластичного трафика. Примеры использования аппроксимации RSR представлены в [1, 11].

Системы массового обслуживания с изменяющейся во времени интенсивностью обслуживания были ранее рассмотрены в различных ситуациях, например в [17] рассматривается система массового обслуживания, в которой приоритетное внимание уделяется нескольким потокам, управляемым Марковски модулированным Пуассоновским процессом (ММПП), с конечным пространством состояний и низким приоритетом потоков, которые распределяют оставшуюся емкость обслуживающего устройства в соответствии с дисциплиной разделения обслуживающего устройства. Предполагая, что вызовы прибывают в систему в соответствии с пуассоновским законом, и что время обслуживания распределено по экспоненциальному закону, авторы [17] получают решение с помощью матричных методов анализа. Похожие модели были изучены в работах [15, 16] с помощью квази-процесса рождения и гибели, связанного с системой, и с помощью матричных методов анализа. В данном случае, характеристики очереди в равновесии выражаются в терминах спектральных величин некоторых матриц. В [2] описаны и изучены с помощью анализа возмущений Марковских цепей

приоритетные системы обслуживания с быстрой динамикой, которые могут быть описаны с помощью квази-процессов рождения и гибели. В [6] изучаются распределения с хвостом очереди M/M/1 с двумя скоростями обслуживания.

Достаточно сложно получить качественные результаты для систем массового обслуживания с изменяемыми скоростями обслуживания, например, для изучения влияния изменяющейся скорости обслуживания на производительность системы. Интуитивно понятно, что изменяющаяся интенсивность будет ухудшать производительность, но строго говоря, об этом мало что известно. Основная цель работы заключается в получении представления об этих явлениях, рассматривая систему со слабыми возмущениями.

В работе предполагается, что интенсивность обслуживания очереди M/M/1 во время t равна $\mu + \epsilon r(X(t))$ для некоторой функции r , где $(X(t))$ есть процесс, описывающий окружение, влияющее на интенсивность обслуживания. В [8] предложено, что процесс $(X(t))$ есть процесс диффузии, и что $r(x) = -x$. В этой работе предполагается, что функция возмущений r имеет общий характер и что процесс, описывающий окружение $(X(t))$ стационарный и Марковский.

Кроме того, большой интерес представляет разложение степенного ряда, описывающего средний период занятости по ϵ , что является количественной величиной возмущений. Аппроксимация RSR применима относительно члена первого порядка: очередь с изменяющимся временем обслуживания идентична очереди M/M/1 с фиксированным временем обслуживания, эквивалентным среднему времени обслуживания $\mu + \epsilon E(r(X(0)))$.

Обобщая наблюдения с результатами, полученными в [3], можно заключить, что аппроксимация RSR справедлива при среднем уровне загрузке очереди клиентами. Анализ члена второго порядка гораздо сложнее; корреляции процесса $(X(t))$ начинают играть существенную роль, и соответственно аппроксимация RSR перестает быть актуальной.

Работа организована следующим образом. Модель описана в разделе 2. В разделе 3 производится вычисление члена первого порядка степенного ряда, описывающего среднюю продолжительность периода занятости.

В последующих статьях будет выведен член второго порядка и обоснованы возможные применения полученных результатов.

2. Модель

2.1. Обозначения и допущения

Везде на протяжении данной работы $Z(t)$ определяет число клиентов в момент времени t в очереди M/M/1, со интенсивностью поступления λ и интенсивностью обслуживания μ . Переменная V означает продолжительность обслуживания для

одного клиента. Известно, что $Z(0)=1$, $V = \inf \{s \geq 0 : Z(s) = 0\}$.

Предполагается, что условие стабильности $\lambda < \mu$ выполняется. $(L(t))$ распределено геометрически, с параметром $\rho = \lambda/\mu$. Для $x \geq 1$ переменная V_x означает продолжительность обслуживания для x клиентов. По определению, $V_1 = V$. Условимся, что если далее будем использовать переменные V , V_1 и V'_1 , то предполагается, что они независимы и распределены по одному и тому же закону. Для краткости, будем называть эту очередь S-очередью.

Для $\xi \geq 0$ N_ξ означает Пуассоновский процесс интенсивностью ξ . Аналогично, для $0 \leq a < b$, $N_\xi(a, b)$ означает количество точек случайного дискретного процесса на интервале $[a, b]$. В частности, N_λ будет представлять процесс, описывающий интенсивность прибытия, N_μ - процесс обслуживания в S-Очереди. Предполагается, что Пуассоновские процессы N_λ и N_μ независимы друг от друга и от модулирующего Марковского процесса $(X(t))$. Процесс $(Z(t))$ может быть представлен как решение стохастического дифференциального уравнения

$$dZ(t) \square Z(t) - Z(t-) = N_\lambda([t, t+dt]) - L_{\{Z(t-)>0\}} N_\mu([t, t+dt]) = (1) = dN_\lambda(t) - L_{\{Z(t-)>0\}} N_\mu(t),$$

где $Z(t-)$ есть левый предел $Z(s)$ при $s \square t$. Представление Марковских процессов массового обслуживания в виде решения стохастических дифференциальных уравнений описано в [18].

Очередь с возмущениями. Рассмотрим очередь M/M/1, интенсивность обслуживания которой определяется как функция от некоторого процесса $(X(t))$, который берет значения из некоторого пространства, обозначаемого S . Предполагаем, что процесс $(X(t))$ - эргодический Марковский процесс на S . Обычно пространство состояний окружения S есть конечный (или исчислимый) набор, на котором $(X(t))$ есть Марковский Модулированный Пуассоновский Процесс (ММПП), либо, в случае диффузии, $S = R$ (для примера см. [8]). Инвариантная мера процесса $(X(t))$ обозначается как ν . Марковское обозначение $E_x(\square)$ будет относиться только к начальному состоянию x Марковского процесса $(X(t))$, таким образом $E_\nu(\square)$ будет означать предполагаемое значение, когда процесс $(X(t))$ находится в точке равновесия.

Переменная $\tilde{Z}^\epsilon(t)$ означает число клиентов во время t в очереди M/M/1 с изменяющейся во времени интенсивностью обработки. Процесс $(\tilde{Z}^\epsilon(t), X(t))$ есть Марковский процесс. Переходы процесса $(\tilde{Z}^\epsilon(t))$ задаются следующим образом:

если $\tilde{Z}^\epsilon(t) = 1$ и $X(t) = x$ в момент t ,

$$1 \rightarrow \begin{cases} 1+1 & \text{при интенсивности } \lambda, \\ 1-1 & \text{при интенсивности } (\mu + \epsilon r(x))L_{\{t>0\}} \end{cases}$$

для некоторой функции $r(x)$ на пространстве состояний окружения S и некоторого маленького параметра $\epsilon \geq 0$.

Если $p(x) > 0$, это означает, что есть свободное место для обслуживания в сравнении с S-Очередью. Напротив, если $p(x) < 0$, обслуживающее устройство имеет меньшую пропускную способность, чем у S-Очереди. Величина $p^+(a)$ (и соответственно $p^-(a)$) определяется как $\max(p(a), 0)$ (соответственно $\max(0, -p(a))$). В момент $t \geq 0$ дополнительная емкость определяется как $\varepsilon p^+(X(t))$ и $-\varepsilon p^-(X(t))$ есть занятая емкость. Возмущения, рассматриваемые в статье - регулярные [2].

Переменная \tilde{B}^ε означает продолжительность периода занятости, начинающегося с одного клиента, учитывая, что $\tilde{Z}^\varepsilon = 1$, $\tilde{B}^\varepsilon = \inf \{s \geq 0 : \tilde{Z}^\varepsilon(s) = 0\}$.

Для $x \geq 1$ переменная \tilde{B}_x^ε означает продолжительность периода занятости, начинающегося с x клиентов ($\tilde{B}_1^\varepsilon = \tilde{B}^\varepsilon$).

Предположим, что:

- (H1) функция $|p(x)|$ ограничена константой $M > 0$;

- (H2) $\varepsilon \sup \{ |p(x)| : x \in S \} < \mu$.

Следующее утверждение утверждает, что длина цикла занятости интегрируема. Остальная часть статьи посвящена расширению его ожидаемого значения по отношению к ε .

Утверждение 1. При $\lambda < \mu$ существуют некоторые константы K и $\varepsilon_0 > 0$ такие, что для любых $\varepsilon < \varepsilon_0$ и $n \geq 1$, $\sup_{x \in S} E(\tilde{B}_n^\varepsilon | X(0) = x) \leq Kn$.

Доказательство. Если выбрать ε_0 таким образом, что $\mu_0 \square \mu - \varepsilon_0 \inf \{p^-(x) : x \in S\} > \lambda$.

то понятно, что количество клиентов в Р-очереди меньше, чем количество клиентов в очереди М/М/1 со интенсивностью прибытия λ и интенсивностью обслуживания μ_0 .

Следовательно, соответствующие периоды занятости сравниваются похожим образом, и этого достаточно, чтобы задать $K = 1/(\mu_0 - \lambda)$.

Очередь с изменяющимся временем обслуживания, описанную выше, будем называть очередью с возмущениями, или, для краткости Р-Очередью. Случай с $\varepsilon = 0$, очевидно, соответствует S-очереди.

2.2. Добавляемые и компенсирующие отправления

Основная идея анализа возмущений состоит в том, чтобы связать периоды занятости для процессов $(Z(t))$ и $(\tilde{Z}^\varepsilon(t))$ при условии, что процесс прибытия для обеих очередей - N_λ .

Добавляемые отправления. Обозначим через N^+ негомогенный Пуассоновский процесс, интенсивность которого задается следующим образом: $t \rightarrow \varepsilon p^+(X(t))$.

На $(X(t))$ число точек из N^+ на интервале $[a, b]$, $0 \leq a \leq b$, распределено Пуассоновски с параметром

$$\varepsilon \int_a^b p^+(X(s)) ds.$$

Точки из N^+ , обозначенные как $0 < t_1^+ \leq t_2^+ \leq \dots \leq t_n^+ \leq \dots$, называются добавляемыми отправлениями. В частности,

распределение расположения t_1^+ , первой точки из N^+ после 0, задано для $x \geq 0$ следующим выражением:

$$P(t_1^+ \geq x) = P(N^+([0, x]) = 0) = E \left(\exp \left(-\varepsilon \int_0^x p^+(X(s)) ds \right) \right). \quad (2)$$

В [10] представлены негомогенные Пуассоновские процессы как вдвойне стохастические Пуассоновские процессы.

Компенсирующие отправления. Обозначим через N^- дискретный процесс, полученный прореживанием дискретного процесса N_μ (см. [18]). Он определяется следующим образом: при $s > 0$ точка Пуассоновского процесса N_μ есть точка из N^- с вероятностью $\varepsilon p^-(X(s))/\mu$. Таким образом, N^- есть стационарный дискретный процесс с интенсивностью $\varepsilon p^-(X(s))$. Точка из N^- называется компенсирующим отправлением. Точки дискретного процесса N^- обозначенные как $0 < t_1^- \leq t_2^- \leq \dots \leq t_n^- \leq \dots$ для $x > 0$, определяются из

$$P(t_1^- \geq x) = E \left(\prod_{i=1}^{N_\mu([0, x])} \left(1 - \frac{\varepsilon p^-(X(s_i))}{\mu} \right) \right), \quad (3)$$

где (s_i) есть точки дискретного процесса N_μ .

Учитывая приведенные обозначения, несложно показать, что Марковский процесс $(\tilde{Z}^\varepsilon(t))$ имеет такое же распределение, как и решение стохастического дифференциального уравнения $d\tilde{Z}^\varepsilon(t) = dN_\lambda(t) - L_{\{\tilde{Z}^\varepsilon(t-) > 0\}} d(N_\mu + N^+ - N^-)(t)$, (4) которое является аналогом уравнения (1) для Р-Очереди.

3. Анализ периода занятости: член первого порядка

Предположим, что период занятости для одного клиента начинается в момент времени 0 в S-Очереди и Р-Очереди. В этом разделе определим первый член степенного ряда по ε , для ожидаемого значения \tilde{B}^ε , означающего продолжительность периода занятости для Р-очереди. Этот вывод позволит в дальнейшем получить часть материала, необходимого для вычисления более сложного второго члена степенного ряда по ε .

Для первого члена необходимо рассмотреть только случай, когда есть только одно добавляемое отправление либо одно компенсирующее отправление. Очевидно, что вероятность того, что оба события произойдут в одном периоде занятости - порядка величины ε^2 , так как интенсивность ассоциированных с ними Пуассоновских процессов пропорциональна ε .

Для $x \geq 1$ предположение стабильности обеспечивает то, что ожидаемые значения периода занятости, начинающего с x клиентов, а именно $E(B_x)$ и $E(\tilde{B}_x^\varepsilon)$, конечны. Если первое добавляющее или компенсирующее отправление таково, что $t_1^+ > \tilde{B}^\varepsilon$ и $t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon$, то $B = \tilde{B}^\varepsilon$. Теперь рассмотрим возможные варианты.

Одно добавляющее отправление. Если есть только одно добавляющее отправление и нет компенсирующего отправления на $(0, \tilde{B}^\varepsilon)$, то в момент \tilde{B}^ε P-очередь пуста, а в S-очереди есть только один клиент (рис. 1).

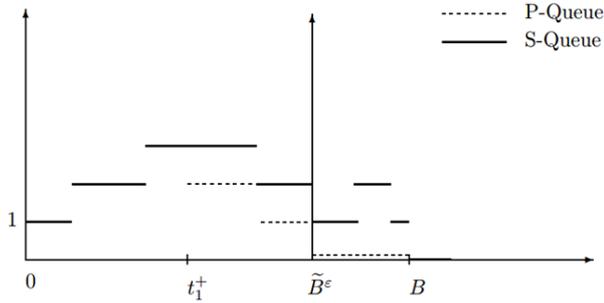


Рис. 1. Период занятости в случае добавляющего отправления

Лемма 2. В случае одиночного отправления

$$E\left((B - \tilde{B}^\varepsilon)L_{\{t_1^+ < B\}}\right) = \varepsilon \frac{E_v[p(X(0))^+]}{(\mu - \lambda)^2} + o(\varepsilon), \quad (5)$$

где v есть равновесное распределение окружения $(X(t))$.

Доказательство. Когда есть только одно добавляющее отправление, переменная \tilde{B}^ε находится между t_1^+ и t_1^- . Можно записать

$$E\left((B - \tilde{B}^\varepsilon)L_{\{t_1^+ < B\}}\right) = E\left((B - \tilde{B}^\varepsilon)L_{\{t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_1^-, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon\}}\right) + \Delta, \quad (6)$$

где член, означающий смещение Δ , можно ограничить следующим образом:

$$\Delta \leq E\left(\left|B - \tilde{B}^\varepsilon\right| \left(L_{\{t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon\}} + L_{\{t_1^- \leq \tilde{B}^\varepsilon, t_1^+ \leq \tilde{B}^\varepsilon\}} \right) \right). \quad (7)$$

Оценим первое слагаемое правой части (6). Исходя из уравнения (2) и ограничений для p , получим:

$$\begin{aligned} P(t_1^+ \leq B) &= 1 - E\left(\exp\left(-\varepsilon \int_0^B p^+(X(s)) ds\right)\right) = \\ &= \varepsilon E\left(\int_0^B p^+(X(s)) ds\right) + o(\varepsilon) = \\ &= \varepsilon E(B) E_v(p^+(X(0))) + o(\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\mu - \lambda} E_v(p^+(X(0))) + o(\varepsilon), \end{aligned}$$

так как B и $(X(t))$ независимы, и $(X(t))$ - стационарна. В соответствии с сильным Марковским свойством в момент \tilde{B}^ε , условно при возникновении события $\{t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, \tilde{B}^\varepsilon < t_1^-\}$, S-

Очередь в момент \tilde{B}^ε начинает независимый период занятости с одним клиентом, и поэтому

$$\begin{aligned} E\left((B - \tilde{B}^\varepsilon)L_{\{t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon\}}\right) &= P(t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon) \times \\ &\times E\left((B - \tilde{B}^\varepsilon) | t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon\right) = P(t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon) E(B_1). \end{aligned}$$

Таким образом, если $\{t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon\} = \{t_1^+ < B\}$ во время события $\{t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon\}$, то

$$\begin{aligned} P(t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon) &= P(t_1^+ < B) - P(t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon, t_2^+ < \tilde{B}^\varepsilon) - \\ &- P(t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon, t_1^- < \tilde{B}^\varepsilon) + P(t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon, t_2^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_2^+, t_1^- < \tilde{B}^\varepsilon) = \\ &= P(t_1^+ < B) + o(\varepsilon), \end{aligned}$$

так как два или более дополнительных перехода в одном и том же периоде занятости есть $o(\varepsilon)$. Таким же образом, снова используя сильное Марковское свойство, получим следующую оценку

$$\begin{aligned} E\left(\left|B - \tilde{B}^\varepsilon\right| L_{\{t_1^+ < \tilde{B}^\varepsilon, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon\}}\right) &\leq \\ &\leq \sum_{n \geq 2} E(B_n) P(t_n^+ < \tilde{B}^\varepsilon < t_{n+1}^+, t_1^- > \tilde{B}^\varepsilon) \leq \\ &\leq \frac{1}{\mu - \lambda} \sum_{n \geq 2} n P(N^+([0, B]) = n). \end{aligned}$$

Действительно, учитывая S-очередь, $N^+([0, B])$ имеет Пуассоновское распределение с параметром $\int_0^B \varepsilon p^+(X(s)) ds$, который подразумевает,

$$\begin{aligned} &\text{что} \\ &\sum_{n \geq 2} n P(N^+([0, B]) = n) = \\ &= E\left(\int_0^B \varepsilon p^+(X(s)) ds\right) - E\left(\int_0^B \varepsilon p^+(X(u)) du \exp\left(-\varepsilon \int_0^B p^+(X(s)) ds\right)\right) = o(\varepsilon) \end{aligned}$$

и первый член в правой части неравенства (7) таким образом несущественен в первом порядке по ε .

Для оценки второго члена в правой части неравенства (7), нужно рассмотреть разные возможные варианты расположения точек t_1^+ и t_1^- .

При том условии, что t_1^+ и t_1^- происходят в течение $[0, B]$ и $\tilde{B}^\varepsilon \geq B$, в момент времени B P-Очередь содержит не более $p \geq 0$ клиентов, если было $p+1$ компенсирующих отправлений. Если $D([0, B])$ есть число клиентов на протяжении периода занятости S-Очереди, тогда

$$\begin{aligned} E\left(\tilde{B}^\varepsilon - B | L_{\{\tilde{B}^\varepsilon \geq B, t_1^+ \leq B, t_1^- < B\}}\right) &\leq \\ &\leq E\left(E_{X(B)}(B_{D([0, B])})\right) P(t_1^- < B, t_1^+ \leq B \leq t_2^+) \leq \\ &\leq K E(D([0, B])) = P(t_1^- < B, t_1^+ \leq B \leq t_2^+) = o(\varepsilon), \end{aligned}$$

в соответствии с Утверждением 1. С другой стороны,

$$E\left(\tilde{B}^\varepsilon - B | L_{\{\tilde{B}^\varepsilon \geq B, t_1^+ \leq B, t_1^- \leq B\}}\right) \leq E\left(BL_{\{t_1^+ \leq B, t_1^- \leq B\}}\right) = o(\varepsilon).$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} E\left(\left|B - \tilde{B}^\varepsilon\right| L_{\{t_1^+ \leq \tilde{B}^\varepsilon, t_1^- \leq \tilde{B}^\varepsilon\}}\right) &\leq E\left(\left|B - \tilde{B}^\varepsilon\right| L_{\{t_1^+ \leq B, t_1^- \leq B\}}\right) + E\left(BL_{\{t_1^+ \leq B, B \leq t_1^- \leq \tilde{B}^\varepsilon\}}\right), \\ \text{Следовательно, последний член равен } o(\varepsilon). \end{aligned}$$

Таким образом, делаем вывод, что $\Delta=0(\varepsilon)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. Используя уравнение (6), получаем ожидаемый результат.

Оценка правой части уравнения (6) может оказаться достаточно громоздкой. Однако, стоит отметить, что окружение $(X(t))$ Р-очереди порождает новые зависимости, которые нужно исследовать. Именно поэтому в работе точно описаны условия, при которых сильное Марковское свойство используется для получения члена первого порядка.

Единственное компенсирующее отправление. Теперь предположим, что есть только одно компенсирующее отправление, то есть отправление для S-Очереди компенсируется для Р-Очереди, и не происходит дополнительных переходов на протяжении периода занятости S-очереди. В этом случае, при окончании периода занятости S-очереди, в момент времени B , в Р-очереди появляется один клиент и поэтому начинается период занятости. При условии, что более нет компенсирующих и дополнительных отправок на протяжении $(B, \tilde{B}^\varepsilon)$ в Р-Очереди, тогда разница между обоими периодами занятости имеет распределение, похожее на длительность B_1 для стандартного периода занятости (рис. 2)

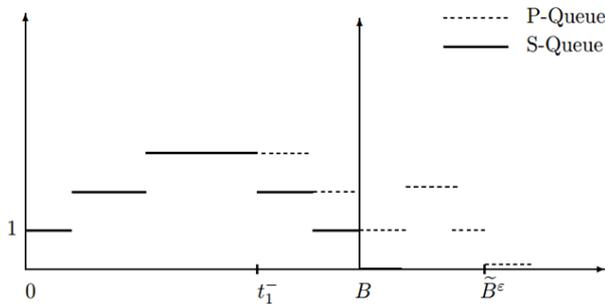


Рис. 2. Период занятости в случае компенсирующего отправления.

Лемма 3. В случае единственного компенсирующего отправления, получим

$$E\left((\tilde{B}^\varepsilon - B)L_{\{t_1^- < B\}}\right) = \varepsilon \frac{E_v(p^-(X(0)))}{(\mu - \lambda)^2} + o(\varepsilon). \quad (8)$$

Доказательство. Используя те же аргументы, что и ранее, получим

$$E\left((\tilde{B}^\varepsilon - B)L_{\{t_1^- < B\}}\right) = E\left(B_1 L_{\{t_1^- < B, B + B_1 < \min(t_1^-, t_2^+)\}}\right) + o(\varepsilon) = E(B_1)P(t_1^- \leq B) + o(\varepsilon).$$

Для оценки $P(t_1^- \leq B)$ обозначим через (D_i) последовательность периодов отправок в S-очереди, и через N - число клиентов, обслуженных за период занятости длиной B . Тогда из уравнения (3) получим тождество

$$\begin{aligned} P(t_1^- \leq B) &= E\left(\prod_{i=1}^N \frac{\varepsilon p^-(X(D_i))}{\mu} \prod_{j=1}^{i-1} \left(1 - \frac{\varepsilon p^-(X(D_j))}{\mu}\right)\right) = \\ &= \frac{\varepsilon}{\mu} E\left(\sum_{i=1}^N p^-(X(D_i))\right) + o(\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{\mu} E(N)E(p^-(X(D_i))) + o(\varepsilon), \end{aligned}$$

учитывая стационарность $(X(t))$ и тождество Вальда. Так как $E(N) = \frac{\mu}{\mu - \lambda}$, получаем уравнение (8).

В выражении для периода занятости для Р-очереди, член ε задается двумя событиями, состоящими из единственного компенсирующего отправления или единственного добавляющего отправления на протяжении периода занятости S-очереди. Следующее утверждение следует из уравнений (5) и (8).

Утверждение 4 (Выражение первого порядка).

$$E(\tilde{B}^\varepsilon) = \frac{1}{\mu - \lambda} - \varepsilon \frac{E_v(p(X(0)))}{(\mu - \lambda)^2} + o(\varepsilon). \quad (9)$$

Уравнение (9) соответствует аппроксимации сокращенного времени обслуживания (RSR). Будем считать, что система работает так, как будто мы имеем классическую очередь M/M/1 со интенсивностью обслуживания $\mu + \varepsilon E_v(p(X(0)))$ и интенсивностью поступления клиентов λ . Для этой очереди средняя продолжительность периода занятости задается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu + \varepsilon E_v(p(X(0))) - \lambda} &= \frac{1}{\mu - \lambda} - \varepsilon \frac{E_v(p(X(0)))}{(\mu - \lambda)^2} + o(\varepsilon), \\ \frac{1}{\mu + \varepsilon E_v[p(X(0))] - \lambda} &= \frac{1}{\mu - \lambda} - \varepsilon \frac{E_v[p(X(0))]}{(\mu - \lambda)^2} + o(\varepsilon), \end{aligned}$$

что совпадает с уравнением (9). В дальнейших исследованиях мы изучим компоненту второго порядка и покажем, что RSR-аппроксимация неприменима.

Заключение

Взаимодействие эластичного и неэластичного трафика в линии передачи телекоммуникационной сети породило изучение воздействия небольших изменений скорости обслуживания на период занятости очереди M/M/1. Изменение скорости обслуживания зависит от независимого стационарного процесса $(X(t))$ и определяется значением параметра $\varepsilon \ll 1$. Вычислены два первых члена разложения степенного ряда по ε , определяющего среднее значение продолжительности периода занятости. Это позволило изучить применимость аппроксимации сокращенного времени обслуживания (RSR), которая заключается в сравнении очереди с возмущениями M/M/1 и классической очереди M/M/1, для которой интенсивность обслуживания постоянна и эквивалентна среднему значению возмущений. Для первого члена разложения обе системы эквивалентны. Для второго порядка, ситуация более сложная, и показано, что корреляции процесса окружения $(X(t))$ играют ключевую роль.

Литература

1. Agrawal, R. On a reduced load equivalence for fluid queues under subexponentiality [Text] / R. Agrawal, A.M. Makowski, P. Nain // *Queueing Systems. Theory and Applications* 33. - 1999. - №. 1-3. - P. 5-41.
2. Altman, E. Perturbation analysis for denumerable Markov chains with application to queueing models [Text] / E. Altman, K. Avrachenkov, R. Nunez-Queija // *Advances in Applied Probability* 36. - 2004. - № 3. - P. 839-853.

3. Antunes, N. Integration of streaming services and TCP data transmission in the Internet [Text] / N. Antunes, C. Fricker, F. Guillemin, P. Robert // Performance'05 (Juan les Pins), IFP WG. - 2005. - №7.3.
4. Discrete Processes Dynamics Neural Network Simulation Based on Multivariate Time Series Analysis with Significant Factors Delayed Influence Consideration [Text] / V.F. Barabanov, O.Ja. Kravets, I.N. Kryuchkova, O.Yu. Makarov, A.K. Pogodayev, O.N. Choporov // World Applied Sciences Journal. - 2013. - № 23 (9) - P. 1239-1244.
5. Specific Features of Modeling and Developing the Mathematical and Program Software for Designing Intranet-Interfaces during Competitive Development of Information Systems [Text] / S.Yu. Beletskaya, V.K. Zolnikov, O.Ja. Kravets, M.L. Lapshina, E.S. Podvalny // World Applied Sciences Journal. - 2013. - № 23 (12). P. 64-70.
6. Boxma, O.J. The M/M/1 queue in a heavy-tailed random environment [Text] / O.J. Boxma, I.A. Kurkova // Journal of the Netherlands Society for Statistics and Operations Research 54. -2000. - №2. P. 221–236.
7. Delcoigne, F. Modeling integration of streaming and data traffic [Text] / F. Delcoigne, A. Proutiere, G. Regnie // ITC specialist seminar on IP traffic (Wurzberg, Germany). - July. - 2002.
8. Fricker, C. Perturbation analysis of an M/M/1 queue in a diffusion random environment, preprint [Text] / C. Fricker, F. Guillemin, P. Robert // January. - 2004.
9. Govorskii, A.E. Mathematical Modeling of Inhomogeneous Traffic in a Heterogeneous Integrated Corporate Data Control Systems [Text] / A.E. Govorskii, O.Ja. Kravets // Automation and Remote Control. - Vol. 73. - No. 7. - 2012. – P. 1269-1278.
10. Grandell, J. Point processes and random measures [Text] / J. Grandell// Advances in Applied Probability. – 1977. - № 9. – P. 502–526.
11. Jelenkovic, P. Resource sharing with subexponential distributions [Text] / P. Jelenkovic, P. Momcilovic // Infocom'2002 (New York). – June. - 2002.
12. Kravets, O.Ja. Mathematical Modeling of Parametrized TCP Protocol [Text] / O.Ja. Kravets // Automation and Remote Control. - Vol. 74. - No. 7. - 2013. – P. 1218-1224.
13. Switching subsystems within the framework of distributed operational annunciator and monitoring systems: program design features [Text] / O.Y. Kravets, O.Y. Makarov, S.A. Oleinikova, V.M. Pitolin, O.N. Choporov // Automation and Remote Control. - 2013. -№ 74(11). - P. 1919-1925.
14. Massoulie, L. Bandwidth sharing: Objectives and algorithms [Text] / L. Massoulie, J. Roberts // INFOCOM '99. Eighteenth Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. – 1999. - P. 1395–1403.
15. Nunez-Queija, R. Sojourn times in a processor sharing queue with service interruptions [Text] / R. Nunez-Queija // Queuing Systems. – 2000. - № 34. P. 351–386.
16. Nunez-Queija, R. Sojourn times in non-homogeneous QBD processes with processor sharing [Text] / R. Nunez-Queija // Stochastic Models. – 2001. – P. 61–92.
17. Nunez-Queija, R., Analysis of a multi-server queuing model of ABR [Text] / R. Nunez-Queija, O.J. Boxma// J. Appl. Math. Stoch. An. 11. – 1998. - P. 339–354.
18. Robert, P. Stochastic networks and queues [Text] /P. Robert// Stochastic Modeling and Applied Probability Series, vol. 52, Springer, New-York. - June. - 2003.

Воронежский государственный технический университет

RESEARCH OF M/M/1 QUEUE FOR INFLUENCE OF THE ELASTIC DATA STREAM IN CASE OF INTERMODULAR INTERACTION DETERMINATION

Nguyen Thoai An, O. Ja. Kravets

In article M/M/1 queues with the changing intensity of service are considered. The problem considered in operation – determination of the quantitative characteristics describing influence of inelastic traffic on elastic.

Key words: intensity of service, elastic traffic, accidental surrounding

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С ПРОГНОЗИРУЕМЫМИ РИСКАМИ

С.М. Пасмурнов, О.А. Фиртыч

В статье описывается структура нечетких правил базы знаний системы управления объектами с прогнозируемыми рисками на основе трансформации нечеткой информации в базу знаний, а также входные и выходные данные нечетких переменных, составляющих данные правила

Ключевые слова: нечеткая логика, база знаний, риски, управление рисками

Управление целым классом технических объектов тесно связано с понятием риска. И целью управления в данном случае является минимизация рисков отклонения от желаемых значений характеристик функционирования и развития. Таким образом, система управления такого рода объектами функционирует в условиях неопределенности и случайного характера внешних и внутренних воздействий. Этим обусловлена задача разработки специальных методов, моделей и процедур управления объектами с прогнозируемыми рисками и прогнозирования состояний системы с учетом управляющих воздействий на основе нечеткой логики [1].

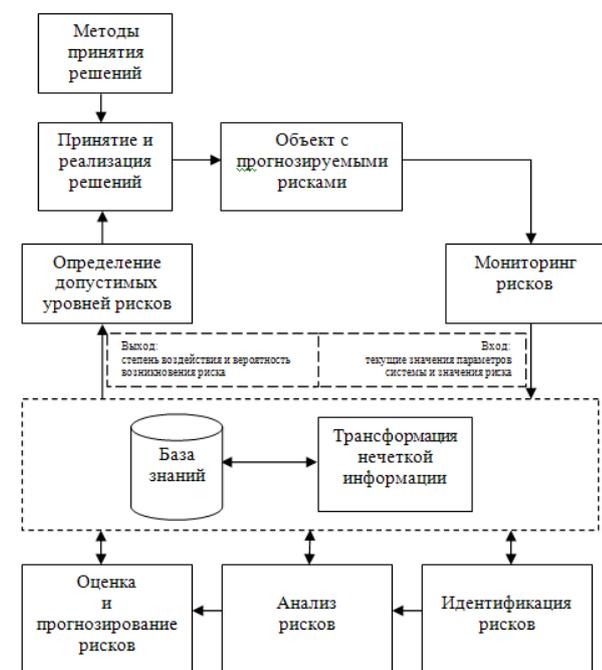


Рис.1. Структурная схема системы управления объектами с прогнозируемыми рисками

Систему управления объектами с прогнозируемыми рисками – это совокупность управляемого объекта, средств автоматизации, нормативной и организационной документации, рабочих процедур, штатных позиций и конкретных

сотрудников, занимающих эти позиции, предназначенная для управления рисками в рамках процесса управления объектом.

Объект с прогнозируемыми рисками определим как объект, обладающий динамическими характеристиками, изменяющимися под влиянием возникновения рисков ситуации, которую необходимо спрогнозировать, чтобы предсказать и предотвратить возможный ущерб от ее реализации как в рамках различных стадий реализации управляемого процесса, так и в конечном результате.

Начальная оценка рисков проводится в два этапа и выделяется в подсистему «Идентификации рисков», которая соответствует качественной оценке рисков, и подсистему «Оценки и прогнозирования рисков».

Для подсистемы «Идентификации рисков» входными параметрами является признаки классификации объектов, а выходными – факторы риска. Факторы риска являются входными параметрами подсистемы «Анализ рисков», выходными переменными являются переменные «Степень воздействия» и «Вероятность возникновения». Качественный анализ рисков подразумевает выявление рисков, присущих проекту, их описание и группировку.

По данным x_j^s, y_i^s определяют интервалы значений параметров и показателей

$$x_j^- = \min(x_j^s), x_j^+ = \max(x_j^s), j = \overline{1, J}, s = \overline{1, S}; \quad (1)$$

$$y_i^- = \min(y_i^s), y_i^+ = \max(y_i^s), i = \overline{1, I}, s = \overline{1, S}; \quad (2)$$

Определенный таким образом интервал разделяют на $(2N+1)$ отрезков с присвоением значений лингвистической переменной на нечетких множествах $A_{jn}, B_{in}, n_j = \overline{1, 2N_j+1}, n_i = \overline{1, 2N_i+1}$. Причем значения N_j и N_i для каждой переменной подбираются индивидуально, представив их через альтернативные переменные. В двоичном исчислении с достаточным для практики ограничением $N_j \leq 4, j = \overline{1, J}; N_i \leq 4, i = \overline{1, I}$:

$$N_j = 1 + Z'_{1j} + 2Z'_{2j}, j = \overline{1, J} \quad (3)$$

$$N_i = 1 + Z'_{1i} + 2Z'_{2i}, i = \overline{1, I} \quad (4)$$

Тогда вектор альтернативных переменных $Z'=\{Z'_{1j}, Z'_{2j}, Z'_{1i}, Z'_{2i}\}$, $j=1, \bar{J}$, $i=1, \bar{I}$ определяет вариант разделения интервалов входных переменных x_j и выходных переменных y_i . Функции принадлежности нечеткого множества $A_j - \mu_{A_j}$, $B_i - \mu_{B_i}$ для значений лингвистической переменной v_i' на нечетком множестве функцию принадлежности μ_{C_i} ставят в соответствие геометрическому разделению интервала и соответствующему набору значений лингвистических переменных (рис.2).

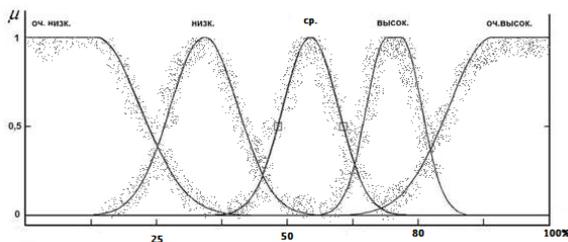


Рис. 2. График функции принадлежности выходной лингвистической переменной «Степень воздействия риска» Для значений: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая»

В зависимости от используемого типа функции принадлежности и способа ее параметризации на наборах лингвистических значений переменных x_j , v_i' , y_i рассматривается множество $v = 1, \bar{V}$ вариантов, которое представляется через альтернативные переменные в двоичном исчислении с достаточным для практики ограничением $V \leq 8$:

$$V = 1 + Z_1'' + 2Z_2'' + 3Z_3'' \quad (5)$$

Итоговая оценка рисков, оказывающих влияние на управляемый объект, формируется на основе экспертных оценок список рисков, которые могут возникнуть в результате функционирования системы управления объектами с прогнозируемыми рисками. Список рисков может включать в себя 50-100 пунктов в зависимости от предметной области и масштабности системы. После первоначального составления или актуализации списка прогнозируемых рисков, все риски необходимо оценить по следующим параметрам:

- вероятность наступления;
- степень воздействия.

Оценки по этим параметрам получены с предыдущих этапов (качественная и количественная оценка рисков). Эти параметры оцениваются нечеткими значениями из набора:

- очень низкая;
- низкая;
- средняя;
- высокая;
- очень высокая.

Подключение аппарата нечеткой логики к оценке и прогнозированию рисков инвестирования позволяет использовать для автоматизированной обработки не только численные данные, но и нечетко определенные и качественные характеристики.

Нечеткая логика может быть применена для анализа критериев чистой текущей стоимости. Для этого годовой чистый денежный поток и ставка дисконтирования должны быть приведены к нечетким числам треугольной формы.

$$\tilde{C}_h = [\underline{C}_h, C_h^m, \bar{C}_h] \quad (6)$$

где $\underline{C}_h, C_h^m, \bar{C}_h$ - это минимальное, абсолютное и максимальное значение годового чистого денежного потока C_h . А нечеткое представление ставки дисконтирования соответственно имеет вид:

$$\tilde{a} = [\underline{a}, a^m, \bar{a}] \quad (7)$$

Нечеткое представление чистой текущей стоимости таким образом:

$$N\tilde{P}V = [NPV, NPV^m, \overline{NPV}] \quad (8)$$

Таким образом, следует:

$$\begin{aligned} NPV &= \sum_{h=0}^t \frac{C_h}{(1+a)^h}, \\ NPV^m &= \sum_{h=0}^t \frac{C_h^m}{(1+a^m)^h}, \\ \overline{NPV} &= \sum_{h=0}^t \frac{\bar{C}_h}{(1+\bar{a})^h}. \end{aligned} \quad (9)$$

Инвестиционный риск существует при $NPV < 0$, значение риска R может быть определено как отношение между областью отрицательных значений NPV и всей областью, описывающей значения NPV :

$$R = \frac{\int_0^0 \mu_{NPV}(x) dx}{NPV} \quad (11)$$

Риск может быть интерпретирован в нечеткое подмножество:

$$\tilde{R} = \{(R_1, \mu_{\tilde{R}}(R_1)), (R_2, \mu_{\tilde{R}}(R_2)), \dots, (R_n, \mu_{\tilde{R}}(R_n))\}, \quad (12)$$

где $\mu_{\tilde{R}}(R_k) = \mu_{\tilde{r}}(t_k), k = 1, \dots, n$.

Для принятия решений на различных этапах

мониторинга рисков и принятия решений в условиях риска необходимо получить списки факторов риска, наиболее актуальных в данный момент. Для упрощения представления функции принадлежности этих переменных представлены в треугольном виде (рис.3).

Вероятность наступления риска может быть определена при выборке рисков или устанавливаться экспертом, лицом принимающим решение, компетентным в оценке риска в данной области.

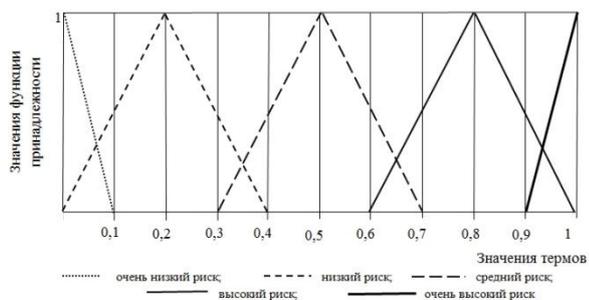


Рис. 3 . Иллюстрация лингвистических термов нечеткой переменной «Вероятность возникновения рассматриваемого риска»

Аналогично для объекта задается степень воздействия риска. При этом если риск воздействует на несколько критериев эффективности функционирования системы, то выбирается максимальное значение.

По уже определенным величинам Вероятности возникновения и Степени воздействия риска, можно определить класс риска, исходя из матрицы классов серьезности рисков (табл.).

Риски класса А признаются самыми опасными для любой анализируемой системы. Именно им следует уделить особенно пристальное внимание при управлении рисками и принятии мер по предотвращению реализации рискованной ситуации.

Матрица классов рисков

		Вероятность возникновения		
		Очень низкая, Низкая	Средняя	Высокая, Очень высокая
Степень воздействия	Очень низкая, Низкая	С	С	В
	Средняя	С	В	В
	Высокая, Очень высокая	В	В	А

Риски класса В также являются критичными, особенно в краткосрочном прогнозировании.

Риски класса С должны рассматриваться в системе мониторинга, но не требуют немедленного вмешательства. Необходимость реагирования на

риски данного класса является индивидуальной для различных видов систем и объектов с прогнозируемыми рисками.

По уже определенным величинам вероятности возникновения и степени воздействия риска, можно определить класс риска, исходя из матрицы классов серьезности рисков. Риски класса А признаются самыми опасными для управляемого объекта с прогнозируемыми рисками. Им следует уделить особенно пристальное внимание при управлении рисками и принятии мер по предотвращению реализации рискованной ситуации. Риски класса В также являются критичными, особенно в краткосрочном прогнозировании. Риски класса С должны рассматриваться в системе мониторинга, но не требуют немедленного вмешательства. Необходимость реагирования на риски данного класса может варьироваться для различных видов объектов с прогнозируемыми рисками

Представленное выше распределение классов в зависимости от вероятности возникновения риска и степени его воздействия на объект с управляемыми рисками предложено для системы управления инвестиционным процессом.

Планирование мониторинга, предотвращения и реагирования на риски необходимо для рисков, класс которых был определен как А и В. Для рисков класса С данные мероприятия носят рекомендательный характер, но остаются на усмотрение лица, ответственного за данный риск. При этом разрабатываются планы по мониторингу, предотвращению и реагированию на рискованную угрозу или возникновение рискованной ситуации.

Результирующие правила определения классов рисков имеют следующий вид (13):

$$R^s: \text{IF } (x^s_1=A^s_1, x^s_2=A^s_2), \text{ THEN } (y^s=B^s) \quad (13)$$

где $s, s = \overline{1, S}$ – количество факторов риска, определенных для данного объекта;

x^s_1 – вероятность возникновения s-риска;

x^s_2 – степень воздействия риска на результаты функционирования системы;

A^s_1, A^s_2 – значения лингвистических переменных «Вероятность возникновения рассматриваемого риска» и «Степень воздействия рассматриваемого риска»;

y^s – класс риска;

B^s – значение нечеткой переменной из набора классов рисков.

В соответствии с матрицей классов рисков производится назначение одного из трёх классов риска. Таким образом, формулируются правила по каждому риску, определяя порядок мониторинга и процедуры реагирования на риск.

Для каждого риска указывается дата актуальности, которая является временным ограничением по мероприятиям направленным на предотвращение риска. Если по достижении этого срока рискованная ситуация не возникла, то

необходимо принять решение о закрытии подсистемы мониторинга данного риска или срок актуальности риска должен быть отодвинут.

К моменту начала функционирования управляемой системы для эффективного управления объектом с прогнозируемыми рисками в подсистеме управления рисками должны быть:

- реализован список рисков с заполненными паспортами, а также определена их классификация;
- сформулированы планы мониторинга, реагирования и предотвращения рисков всех классов;

- определены лица, ответственные за определенные риски, а также лицо, управляющее объектом с прогнозируемыми рисками.

Для каждого класса рисков необходимо задать период мониторинга. Для класса А рекомендуется производить мониторинг ежедневный, В – еженедельный. Для мониторинга рисков класса С период определяется составом риск-менеджеров.

Мониторинг рисков является не отдельным этапом алгоритма управления рисками, а непрерывным процессом, который сопровождает непрерывно процесс функционирования системы объектов с прогнозируемыми рисками. После завершения каждого цикла управления и мониторинга рисков необходимо пополнять базу знаний системы идентификации рисков обновленными знаниями.

Если для объекта были идентифицированные риски, ранее не внесенные в базу знаний, то необходимо вносить полный паспорт риска, а также ретроспективную информацию о трендах показателей, которые позволят в будущих циклах управления спрогнозировать появление данного риска.

Мониторинг рисков во время функционирования системы является закономерным завершающим звеном и в то же время непрерывным процессом, который обеспечивает актуальность решений при изменчивых условиях внешней среды или при ошибках прогнозирования.

Перечень рисков становится главным инструментом мониторинга рисков, их предупреждения, а также предотвращения негативного влияния на управляемый объект потенциальных рисков ситуаций. В этом списке должна содержаться и поддерживаться в актуальном состоянии информация, необходимая для управления рисками.

На этапе проектирования системы и предварительного прогнозирования рисков необходимо составить перечень из 50-100 рисков в зависимости от масштабности системы. При повторных итерациях на этапах сопровождения функционирования системы с объектом прогнозируемыми рисками необходимо выделять 20-30 рисков, которые будут подвержены наиболее детальному мониторингу.

После того, как будет сформирован исчерпывающий перечень рисков, необходимо провести SWOT-анализ, методология которого позволяет выявить сильные и слабые стороны объекта с прогнозируемыми рисками и способы влияния на последние, а также описать способы реагирования на риски. Именно результаты SWOT-анализа являются выходными данными для дальнейшей количественной оценки рисков, и использоваться в прогнозировании различных сценариев реализации рисков ситуаций в системе объекта с прогнозируемыми рисками.

Таким образом, происходит актуализация правил в базе знаний на основе результатов непрерывного мониторинга рисков в системе управления объектами с прогнозируемыми рисками.

Литература

1. Львович, Я.Е. Формирование перспективных решений на основе базы нечетких правил [Текст] / Я.Е. Львович, О.Г. Яскевич, О.А. Фиртыч // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 6.- № 10.- С.58-59.

2. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление [Текст] пер. с англ. / А. Пегат; под. ред. Ю.В. Тюменцева - 2-ое изд. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. - 2013. - 802 с.

Воронежский государственный технический университет

FORMING KNOWLEDGE BASE FUZZY RULES IN LENS WITH A PREDICTED RISKS MANAGEMENT SYSTEM

S.M. Pasmurnov, O.A. Firtych

The article describes the structure of knowledge base fuzzy rules in lens with a predicted risks management system based on the fuzzy information transformation into the knowledge base, besides it describes input and output fuzzy variables that rules are including

Key words: fuzzy logic, knowledge base, risk, risk management

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОРРЕКЦИИ БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНИКА НА ОСНОВЕ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ТРАЕКТОРИИ ЕГО ДВИЖЕНИЯ

А.А. Кудряш

В статье составляются уравнения ошибок для задачи о движении беспилотника при условии привлечения информации о высоте, а также формируются уравнения на основе измерений дальности до объекта и угла. Задача оценивания ошибок решается при помощи фильтра Калмана. Рассматривается два вида движения: по окружности и по прямой

Ключевые слова: беспилотник, математические модели, коррекция, инерциальная навигационная система, ошибки, фильтр Калмана

Уравнения, которые выводятся в работе, используются для коррекции грубой бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС), расположенной на борту беспилотника. БИНС состоит из трёх датчиков линейных ускорений (акселерометров), трёх датчиков угловых скоростей и бортового вычислителя, задачей которого является интегрирование динамических уравнений Ньютона, причём плата, с которой жёстко связаны датчики, крепится на корпусе движущегося объекта. Коррекция проводится при помощи информации о дальности до объекта с известными координатами и угле между направлением на объект и одной из осей трёхгранника, связанного с БИНС. Для упрощения выводимых уравнений предполагается, что объект находится на экваторе, а также привлекается информация о высоте (например, при помощи баро-высотомера).

В работе приняты следующие обозначения:

- M – точка, показывающая местоположение чувствительной массы акселерометров. Измеряются действующие на эту массу силы. За счёт нормировки чувствительную массу можно сделать единичной;

- Mz – приборный трёхгранник. В проекциях на оси этого трёхгранника измеряется внешняя сила, приложенная к точке M , и проекции его угловой скорости. Результаты измерений

$$f'_z = f_z + \Delta f_z,$$

$$\omega'_z = \omega_z - v_z,$$

где $\Delta f_z = (\Delta f_{z_1}, \Delta f_{z_2}, \Delta f_{z_3})^T$ – вектор погрешностей измерений акселерометров, $v_z = (v_{z_1}, v_{z_2}, v_{z_3})^T$ – вектор погрешностей измерений датчиков угловых скоростей;

- $O\xi$ – инерциальный трёхгранник. Ось $O\xi_3$ направлена на северный полюс, плоскость $O\xi_1\xi_2$ – экваториальная, ось $O\xi_1$ направлена в точку весеннего равноденствия;

- $O\eta$ – гринвичский трёхгранник, жёстко связанный с Землёй. Точка O – геометрический центр Земли, ось $O\eta_3$ совпадает с осью вращения Земли,

плоскость $O\eta_1\eta_2$ – экваториальная плоскость, плоскость $O\eta_1\eta_3$ – плоскость гринвичского (нулевого) меридиана. A_η – матрица его ориентации относительно инерциального;

- Mx – географический трёхгранник. Ориентация этого трёхгранника полагается полусвободной, то есть компонента вектора относительной угловой скорости этого трёхгранника относительно гринвичского в проекциях на его оси Ω_3 равна нулю. Тогда в начальный момент он выбирается следующим образом: ось Mx_3 направлена по внешней нормали к поверхности Земли, Mx_2 лежит в плоскости текущего меридиана и направлена на Север, а Mx_1 направлена по касательной к параллели на Восток, а в последующие моменты времени этот трёхгранник выбирается таким образом, чтобы проекция его собственной относительной угловой скорости на ось Mx_3 была равна $-\dot{\lambda}\sin\varphi$, где φ – географическая северная широта – угол между Mx_3 и экваториальной плоскостью $O\eta_1\eta_2$, отсчитываемый к Северу, λ – географическая долгота – угол между проекцией орта \bar{x}_3 на экваториальную плоскость и осью $O\eta_1$, отсчитываемый к Востоку. Это вытекает из тех соображений, что когда объект движется по поверхности Земли, проекция относительной угловой скорости трёхгранника, ориентированного в географической сетке (ориентация которого задана в начальный момент времени), на ось Mx_3 равна $\dot{\lambda}\sin\varphi$. Географический трёхгранник выбирается как опорный, то есть в проекциях на оси этого трёхгранника определяются координаты и скорости объекта (под объектом понимается единичная приведённая чувствительная масса акселерометров);

- Mu – модельный трёхгранник – числовой образ приборного трёхгранника. Предполагается, что он мало отличается от приборного. Угловая скорость этого трёхгранника в проекциях на его оси $\omega_y = \omega'_y$. A_y – матрица его ориентации относительно инерциального трёхгранника, определяется путём решения кинематических уравнений Пуассона $\dot{A}_y = \hat{\omega}_y' A_y$, где начальное значение матрицы A_y определяется начальной выставкой [2]. Смысл обозначения $\hat{\omega}_y'$ приведён ниже;

- $Oy^x(Ox')$ – квазимодельный трёхгранник – числовой образ опорного трёхгранника Mx . Пред-

полагается, что он мало отличается от географического. В проекциях на оси этого трёхгранника в бортовом вычислителе определяются координаты и скорости модельной точки M' . $A_{y,x}$ – матрица ориентации этого трёхгранника относительно инерциального;

- L – матрица ориентации модельного трёхгранника относительно квазимодельного, $L = A_y A_{y,x}^T$;

- B' – матрица ориентации квазимодельного трёхгранника относительно гринвичского. Её элементы находятся при решении модельных уравнений [1]. После её определения определяется матрица $A_{y,x} = B' A_\eta$, откуда находится матрица L ;

- Mz^x – квазиприборный трёхгранник. Его ориентация относительно приборного трёхгранника задаётся матрицей L^T . На оси квазиприборного трёхгранника перепроектируются результаты измерения внешней силы f_z . Результат такого перепроектирования – величина f_z^x служит входной информацией при интегрировании модельных динамических уравнений Ньютона: $f_z^x = L^T f_z$;

- l_x, l_y, l_z – векторы, составленные из координат вектора l в осях трёхгранников Mx, Oy^x, Mz^x соответственно;

- \hat{a} – кососимметрическая матрица $\begin{pmatrix} 0 & a_3 & -a_2 \\ -a_3 & 0 & a_1 \\ a_2 & -a_1 & 0 \end{pmatrix}$, поставленная в соответствие вектору-столбцу $(a_1, a_2, a_3)^T$;

- C^x – матрица ориентации квазиприборного трёхгранника относительно квазимодельного, причём $C^x = E + \hat{\beta}_x$, где $\beta_x = (\beta_{x_1}, \beta_{x_2}, \beta_{x_3})^T$ – вектор малого поворота;

- u – вектор угловой скорости вращения Земли: $|u| = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, $u = (0, |u| \cos \varphi, |u| \sin \varphi)^T$;

- a – большая полуось эллипсоида Земли;

- ω_0 – частота Шулера, $\omega_0^2 = \frac{g}{a} = 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$;

Уравнения ошибок выводятся в осях квазимодельного трёхгранника. Пусть $y = (y_1, y_2, y_3)^T$ и $y' = (y_1', y_2', y_3')^T$ – координаты точек M и M' соответственно в осях квазимодельного трёхгранника. Имеются соотношения:

$$\begin{aligned} y' &= V_y' + \hat{\Omega}_y y', \\ \dot{y} &= V_y + \hat{\Omega}_y y, \end{aligned}$$

где V_y' и V_y – относительные угловые скорости точек M' и M соответственно, а Ω_y – относительная угловая скорость квазимодельного трёхгранника относительно гринвичского трёхгранника. Вычитая из первого равенства второе, получим:

$$\Delta \dot{y} = \Delta V_y + \hat{\Omega}_y \Delta y,$$

где вектор $\Delta y = (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3)^T$ – ошибка в определении местоположения, определяется равенством $\Delta y = y' - y$, $\Delta V_y = (\Delta V_{y_1}, \Delta V_{y_2}, \Delta V_{y_3})^T$ – ошибка в определении скорости, определяется равенством $\Delta V_y = V_y' - V_y$. Полные ошибки в определении коор-

динат и скоростей раскладываются в сумму кинематической и динамической ошибки:

$$\Delta V_y = \delta V_y + \hat{\beta}_y V_y,$$

где $\delta V_y = V_y' - V_y$ – динамическая ошибка, $\hat{\beta}_y V_y$ – кинематическая ошибка. Аналогично:

$$\Delta y = \delta y + \hat{\beta}_y y',$$

где можно положить $y' = (0, 0, a)^T$, поскольку $y = (0, 0, a)^T$ мало отличается от y' , соответственно $\hat{\beta}_y y$ отличается от $\hat{\beta}_y y'$ на величину второго порядка малости. Уравнения ошибок представляют собой систему девяти дифференциальных уравнений первого порядка относительно трёх компонент вектора Δy , трёх компонент вектора динамической ошибки скорости δV_y и трёх координат вектора малого поворота:

$$\begin{cases} \Delta \dot{y} = \delta V_y + \hat{\beta}_y V_y + \hat{\Omega}_y \Delta y \\ \delta \dot{V}_y = (\hat{\Omega}_y + 2\hat{u}_y) \delta V_y - \omega_0^2 (\delta y_1, \delta y_2, \delta y_3)^T + \Delta f_z \\ \dot{\beta}_x = \hat{\omega}_y \beta_x + v_z, \end{cases} \quad (1)$$

$\delta y_1, \delta y_2, \delta y_3$ выражаются через $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$. После привлечения информации о высоте $h^* = h + \rho^*$, где ρ^* – погрешность информации, порядок системы уменьшится до 7, а после пренебрежения малыми второго порядка уравнения ещё более упростятся. Подробно о выводе уравнений можно узнать из [1]. Окончательный вид уравнений будет такой:

$$\begin{cases} \Delta \dot{y}_1 = \delta V_1 + \beta_3 V_2, \\ \Delta \dot{y}_2 = \delta V_2 - \beta_3 V_1, \\ \delta \dot{V}_1 = 2u_3 \delta V_2 - \omega_0^2 \Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1, \\ \delta \dot{V}_2 = -2u_3 \delta V_1 - \omega_0^2 \Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2, \\ \dot{\beta}_x = \hat{\omega}_y \beta_x + v_z, \end{cases} \quad (2)$$

где первые 4 уравнения – скалярные, а в последнем содержится 3 уравнения.

Для того, чтобы решить задачу коррекции БИНС, надо сформировать измерение. Формируется оно следующим образом: пусть измеряется дальность до маяка и угол. Первоначально измеряется угол между одной из осей приборного трёхгранника (Mz_1 или Mz_2) и направлением на маяк, но с помощью матрицы L^T находятся положения осей квази-приборного трёхгранника, соответственно появляется возможность измерить этот угол как угол между направлением на маяк и одной из осей квази-приборного трёхгранника. Результаты измерения обозначим соответственно d^* и ψ^* . Тогда $d^* = d + \rho_d$, $\psi^* = \psi + \rho_\psi$. Сформируем вектор

$$\kappa_z^* = (d^* \cos \psi^*, d^* \sin \psi^*)^T,$$

$$\begin{aligned} \kappa_{1z}^* &= (d + \rho_d) \cos(\psi + \rho_\psi) = d \cos \psi + \rho_d \cos \psi - \\ &- d \rho_\psi \sin \psi = \kappa_{1z} + \rho_{1z}, \end{aligned}$$

где члены второго порядка малости и выше отбрасываются. Аналогично

$$\begin{aligned} \kappa_{2z}^* &= (d + \rho_d) \sin(\psi + \rho_\psi) = d \sin \psi + \rho_d \sin \psi + \\ &+ d \rho_\psi \cos \psi = \kappa_{2z} + \rho_{2z}, \end{aligned}$$

где ρ_{1z} и ρ_{2z} – инструментальные погрешности. Далее, пусть имеются координаты маяка $((\lambda^0, \varphi^0, h^0)^T$. Для упрощения положим $h^0 = 0$. Можно посчитать гринвичские координаты маяка:

$$\begin{aligned}\eta_1^0 &= R \cos \varphi^0 \cos \lambda^0, \\ \eta_2^0 &= R \cos \varphi^0 \sin \lambda^0, \\ \eta_3^0 &= R \sin \varphi^0,\end{aligned}$$

где R – радиус Земли. Зная эти координаты, с помощью матрицы ориентации B' квазимодельного трёхгранника относительно гринвичского можно найти координаты маяка в осях квазимодельного трёхгранника: $y^0 = B' \eta^0$. Тогда можно сформировать вектор

$$\kappa'_y = y^0 - y' = y^0 - y - \Delta y,$$

где y' находится при решении модельных уравнений.

Получается, что $\kappa_y = y^0 - y$ и κ_z – это вектор, направленный из точки, в которой находится чувствительная масса в точку, в которой расположен маяк (а точнее две его горизонтальные координаты), заданный в осях квазимодельного и квазиприборного трёхгранников соответственно. Тогда:

$$\kappa_z = (E + \hat{\beta}_x) \kappa_y.$$

Вектор измерений формируется следующим образом:

$$\begin{aligned}W &= \kappa'_y - \kappa'_z = \kappa_y - \Delta y - (E + \hat{\beta}_x) \kappa_y - \rho_z = \\ &= -\Delta y - \rho_z - \hat{\beta}_x \kappa_y.\end{aligned}\quad (3)$$

Модели погрешностей измерений формируются следующим образом:

$$\begin{cases} \rho_d = \rho_d^0 + \rho_d^{(s)} \\ \rho_\psi = \rho_\psi^0 + \rho_\psi^{(s)} \end{cases}\quad (4)$$

где первые составляющие – постоянные ошибки, а вторые слагаемые – белые шумы известной интенсивности.

Выведенные уравнения ошибок и уравнения измерений используются для оценивания двух горизонтальных компонент вектора полной ошибки координат и двух горизонтальных компонент динамических ошибок скоростей. Оценивание производится при помощи фильтра Калмана. Рассматривается два вида движения: движение по лучу и движение по окружности. Для простоты будем считать, что движение по лучу – движение по экватору по направлению к маяку, находящемуся на экваторе, а движение по окружности – движение вокруг маяка с постоянной скоростью по окружности известного радиуса. В первом случае широта постоянна и равна 0, т.е. географический трёхгранник не меняет ориентацию во времени. Будем считать, что векторы линейных и угловых скоростей проектируются на оси географического трёхгранника (в уравнениях ошибок это можно сделать, так как взаимная ориентация квазимодельного и географического трёхгранников определяется матрицей малого поворота. Тогда чле-

ны в уравнениях ошибок (2), содержащие линейные и угловые скорости, записанные в проекциях на оси географического и квазимодельного трёхгранников, будут отличаться на величины второго порядка малости). В этом случае в уравнениях ошибок $u_3 = 0, V_1 = V$, где V – скорость летательного аппарата. Вектор абсолютной угловой скорости квазимодельного трёхгранника в проекциях на собственные оси имеет вид: $\omega_y = (0, u + \Omega_2, 0)^T$, $\Omega_2 = V/R$ – относительная угловая скорость аппарата. Тогда система уравнений ошибок запишется в виде:

$$\begin{cases} \Delta \dot{y}_1 = \delta V_1 \\ \Delta \dot{y}_2 = \delta V_2 - \beta_3 V \\ \delta \dot{V}_1 = -\omega_0^2 \Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1 \\ \delta \dot{V}_2 = -\omega_0^2 \Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2 \\ \dot{\beta}_1 = -(u + \Omega_2) \beta_3 + v_1 \\ \dot{\beta}_2 = v_2 \\ \dot{\beta}_3 = (u + \Omega_2) \beta_1 + v_3 \end{cases}\quad (5)$$

Что касается уравнений измерений, то из уравнения (3):

$$W = -\Delta y - \rho_z - \hat{\beta}_x \kappa_y,$$

или в скалярном виде:

$$\begin{cases} W_1 = -\Delta y_1 - \rho_d \cos \psi + d \sin \psi \rho_\psi - \beta_3 \kappa_{2y} \\ W_2 = -\Delta y_2 - \rho_d \sin \psi - d \cos \psi \rho_\psi + \beta_3 \kappa_{1y} \end{cases},$$

где $\psi = 0$, $d = d_0 - Vt$ (d_0 – расстояние до маяка в начальный момент времени), а $\beta_3 \kappa_{2y} = 0$ и $\beta_3 \kappa_{1y} = \beta_3 d$ с точностью до малых второго порядка. Тогда система уравнений измерений примет вид:

$$\begin{cases} W_1 = -\Delta y_1 - \rho_d \\ W_2 = -\Delta y_2 - (d_0 - Vt) \rho_\psi + \beta_3 (d_0 - Vt) \end{cases}\quad (6)$$

Во втором случае можно считать, что угол ψ измеряется между одной из осей географического трёхгранника и направлением на маяк (так как географический и квазиприборный трёхгранник отличаются на матрицу малого поворота, соответственно в уравнениях измерений члены, зависящие от угла, измеренного в осях квазиприборного трёхгранника отличаются от членов, зависящих от угла, измеренного в осях географического трёхгранника, на величину второго порядка малости). Кроме того, величина $\lambda \sin \varphi$ в данной задаче оказывается очень малой, следовательно географический трёхгранник и в этом случае можно считать неизменно ориентированным во времени. Будем считать, что окружность достаточно малого радиуса по сравнению с радиусом Земли, поэтому Землю можно считать плоской, т.е. $u_3 = 0$. Пусть ψ – угол поворота летательного аппарата вокруг маяка, $\psi = \frac{Vt}{d}$, t – время движения, d – радиус окружности. Тогда компоненты скорости имеют вид: $V_1 = -V \cos \psi$, $V_2 = -V \sin \psi$. Вектор абсолютной угловой скорости выглядит следующим образом: $\omega_y = (\Omega_1, u + \Omega_2, 0)^T$, где $\Omega_1 = \frac{V}{R} \sin \psi$, $\Omega_2 = -\frac{V}{R} \cos \psi$. Уравнения ошибок имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta \dot{y}_1 = \delta V_1 + \beta_3(-V \sin \psi) \\ \Delta \dot{y}_2 = \delta V_2 - \beta_3(-V \cos \psi) \\ \delta \dot{V}_1 = -\omega_0^2 \Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1 \\ \delta \dot{V}_2 = -\omega_0^2 \Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2 \\ \dot{\beta}_1 = -(u + \Omega_2) \beta_3 + v_1 \\ \dot{\beta}_2 = \Omega_1 \beta_3 + v_2 \\ \dot{\beta}_3 = (u + \Omega_2) \beta_1 - \Omega_1 \beta_2 + v_3 \end{cases} \quad (7)$$

В уравнениях измерений величины $d = \text{const}$, $\psi = \frac{vt}{R}$, соответственно $\beta_3 \kappa_{2y} = \beta_3 d \sin \frac{vt}{R}$, $\beta_3 \kappa_{1y} = \beta_3 d \cos \frac{vt}{R}$ с точностью до малых второго порядка. Уравнения измерений принимают вид:

$$\begin{cases} W_1 = -\Delta y_1 - \rho_d \cos \psi + d \sin \psi \rho_\psi - \beta_3 d \sin \psi \\ W_2 = -\Delta y_2 - \rho_d \sin \psi - d \cos \psi \rho_\psi + \beta_3 d \cos \psi \end{cases} \quad (8)$$

Модели инструментальных погрешностей Δf_z и v_z выбираются следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Delta f_z^{(s)} \\ v_z = v_z^0 + v_z^{(s)} \end{cases}, \quad (9)$$

где первые слагаемые в моделях погрешностей это неизвестные постоянные составляющие, а вторые слагаемые – белые шумы известной интенсивности. В дальнейшем индекс z при использовании ошибок датчиков будет опускаться.

Задача оценивания искомых параметров производится при помощи дискретного фильтра Калмана. Основные соотношения фильтра Калмана здесь не приводятся, о них можно прочитать в [2]. Пусть имеется вектор состояния системы x . Он состоит из двух компонент ошибок определения местоположения объекта в горизонтальной плоскости ($\Delta y_1, \Delta y_2$), двух компонент вектора динамических ошибок скорости ($\delta V_1, \delta V_2$), трёх компонент вектора малого поворота ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$), задающего матрицу ориентации квазиприборного трёхгранника относительно квазимодельного, двух компонент постоянной составляющей ошибки акселерометров ($\Delta f_1^0, \Delta f_2^0$), трёх компонент постоянной составляющей ошибки датчиков угловых скоростей (v_1^0, v_2^0, v_3^0), а также двух величин, отвечающих за постоянные составляющие ошибок определения дальности и угла (ρ_d^0, ρ_ψ^0) – всего 14 компонент.

Также имеется вектор измерений

$$z = (W_1, W_2)^T.$$

В общем виде система записывается следующим образом:

$$\dot{x} = Ax + q,$$

$$z = Hx + r,$$

(уравнения, соответствующие постоянным составляющим погрешностей, т.е. последние 7 уравнений системы записываются в виде $\dot{x}_i = 0$).

Здесь A – матрица состояния системы, H – матрица измерений, q, r – векторы шума динамической системы и помехи измерения соответственно. Предполагается, что шум в данной задаче – дискрет-

ный случайный процесс с нулевым средним и известной интенсивностью.

Возвращаясь к конкретной задаче, рассмотрим вид матриц A и H для конкретных двух случаев. В первом случае (движение по лучу) матрица A определяется системой (5) с учётом модели ошибок датчиков (9), а матрица H – системой (6) с использованием модели ошибок измерений (4).

Для случая движения по окружности матрица A определяется соотношениями (7) и (9), а матрица H – соотношениями (8) и (4).

Далее записываются соотношения фильтра Калмана и оценивается вектор состояния системы. В данной работе не привлекается информация о векторе z и используются только ковариационные соотношения (другими словами, алгоритм фильтра Калмана состоит только из этапа коррекции, этап прогноза не рассматривается)

Стандартные соотношения для фильтра Калмана записываются для случая, когда погрешности измерений не коррелируют между собой, т.е. матрица $R = M[rr^T]$ является диагональной, однако в случае, когда беспилотник движется по окружности, это условие нарушается. В этом случае невырожденным преобразованием C вводится вектор $z^* = Cz = C(Hx + r) = H^*x + r^*$, такой, что координаты r^* не будут коррелировать между собой. К примеру, если выбрать C так, чтобы матрица R равнялась единичной, то $M[r^*r^{*T}] = C^T R C = E$, т.е. $C = R^{-\frac{1}{2}}$. Матрица R в данной задаче зависит от дисперсий случайных составляющих погрешностей определения дальности и угла, которые полагаются известными.

В качестве примера можно привести результаты численного моделирования. Параметры выбирались следующими: скорость аппарата постоянна и равна 50 м/с, начальное расстояние до маяка при движении по лучу равно 100 км, радиус окружности во втором случае – 50 км. Время полёта аппарата – 10 мин. Численные значения ошибок БИНС следующие (имеются ввиду среднеквадратические отклонения величин): $\sigma_{\Delta f^0} = 0.05$ м/с², $\sigma_{\Delta f^{(s)}} = 0.01$ м/с², $\sigma_{v^0} = 0.1$ °/с, $\sigma_{v^{(s)}} = 0.1$ °/ч. Для задания начальных ковариаций вектора состояния использовались следующие величины: $\sigma_{\Delta y} = 100$ м, $\sigma_{\delta V} = 0.5$ м/с, $\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = 10'$, $\sigma_{\beta_3} = 0.5$ °, $\sigma_{\rho_d^0} = 10$ м, $\sigma_{\rho_\psi^0} = 1$ °. Для случайных составляющих ошибок определения дальности и угла соответственно взяты следующие модели: $\sigma_{\rho_d^{(s)}} = 10$ м, $\sigma_{\rho_\psi^{(s)}} = 1$ °. Для оценивания влияния использования дополнительных измерений использовались среднеквадратические отклонения ошибки оценки двух координат ($\Delta y_1, \Delta y_2$) до и после добавления измерений.

Для получения результатов использовалась программа реализации навигационных алгоритмов на языке С, написанная сотрудниками лаборатории Управления и Навигации кафедры Прикладной Механики и Управления МГУ.

Результаты представлены в следующей таблице.

Тип движения	Оцениваемая переменная (СКО)	С использованием измерений [м]	Без использования измерений [м]
Движение по лучу	Δy_1	11.23	37901
	Δy_2	3083.6	37906
Движение по окружности	Δy_1	2.4038	6181.9
	Δy_2	41.079	6185

Отсюда можно сделать вывод, что лучше исследуемые переменные оцениваются при движении по окружности, откуда можно сделать вывод, что задача лучше обусловлена, когда в траектории дви-

жения аппарата присутствуют элементы кругового движения.

Автор выражает благодарность проф. Парусникову Н.А. (МГУ), с.н.с. Попеленскому М.Ю. (МГУ), проф. Шунину Г.Е. (ВГТУ) за обсуждение результатов работы и ценные замечания.

Литература

1. Голован, А.А. Математические основы навигационных систем. Ч. 1. Математические модели инерциальной навигации [Текст] / А.А. Голован, Н.А. Парусников. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 136 с.
2. Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы навигационных систем. Ч. 2. Приложение методов оптимального оценивания к задачам навигации. [Текст] / А.А. Голован, Н.А. Парусников. – М.: Издательство Московского Университета, 2008. – 128 с.

Воронежский государственный технический университет

MATHEMATICAL MODELS OF CORRECTION OF STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM ON THE UNMANNED AERIAL VEHICLE BY USING PARTIAL INFORMATION ABOUT THE TRAJECTORY OF MOTION

A.A. Kudryash

This article includes constitution of error equations for a problem of craft motion provided by using information about altitude as well as making equations based on measures of distance to the object and an angle. This article describes solution of a problem of estimation of craft position error. The problem of error estimation is underway by means of Kalman filter. Two types of motion are considered: full circle driving and driving on the straight

Key words: unmanned aerial vehicle, mathematical models, correction, inertial navigation system, errors, Kalman filter

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОБНОГО ТЕЛА КРИОГЕННОГО ГРАВИМЕТРА

А.А. Кудряш, Г.Е. Шунин, В.Н. Ястребков

В рамках формализма Лагранжа получена нелинейная система уравнений движения сферического пробного тела криогенного гравиметра. Разработана программа для численного решения этой системы дифференциальных уравнений второго порядка в системе компьютерной математике Scilab

Ключевые слова: уравнения движения, пробное тело, криогенный гравиметр, программа, моделирование

В качестве чувствительного элемента криогенного гравиметра обычно используется бесконтактный подвес сверхпроводящего пробного тела (ПТ) сферической или аксиально-симметричной формы в неоднородном магнитном поле сверхпроводящих короткозамкнутых аксиально-симметричными катушек с током [1]. Для оценки порога чувствительности и линейности отклика гравиметра необходимо учитывать перекрёстные связи между степенями свободы ПТ и нелинейности, вносимые системой подвеса ПТ. Построение уравнений движения сферического ПТ с учётом этих факторов является основной целью данной работы.

Следуя стандартной процедуре [2, 3] для описания движения ПТ, введем две системы координат: одну «неподвижную», т.е. инерциальную систему $\{O, \vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3\}$ и движущуюся систему координат $\{O', \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$, которая предполагается жестко связанной с ПТ и участвующей во всех его движениях. Тогда координаты любой точки ПТ в системе $\{O, \vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3\}$ выразятся через координаты точки O' и матрицу углов поворота a_{ij} следующим образом:

$x_i = r_i + a_{ij}R_j$, где $a_{ij} = (\vec{l}_i, \vec{e}_j)$, R_i – координаты произвольной точки ПТ в подвижной системе координат. Скорость произвольной точки ПТ будет определяться выражением

$$\dot{\vec{X}} = \dot{\vec{r}} + [\vec{\Omega}, \vec{R}], \quad (1)$$

где $\dot{\vec{r}}$ – линейная скорость точки O' , \vec{R} – радиус вектор точки произвольной точки ПТ, Ω – угловая скорость ПТ.

Для ПТ массой M , движущегося в инерциальной системе координат, функция Лагранжа равна [2]

$$L = \int_M \left(\frac{\dot{\vec{X}}^2}{2} - V(\vec{X}) \right) dm - U(\vec{r}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), \quad (2)$$

где $V(\vec{X})$ – потенциальная энергия, связанная с гравитационным полем, а $U(\vec{r}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ – та часть потенциальной энергии, которая обусловлена магни-

тоупругими связями ПТ с корпусом. Потенциальная энергия $U(\vec{r}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ зависит от относительного расстояния \vec{r} между ПТ и корпусом, а также от углов $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ поворота ПТ относительно корпуса. При небольших размерах устройства потенциал гравитационного поля $V(\vec{X})$ можно разложить в ряд Тейлора по степеням x_i

$$V(x_1, x_2, x_3) = V(0) + g_i x_i + \frac{1}{2} V_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (3)$$

где $g_i = -\frac{\partial V}{\partial x_i}$ и $V_{ij} = \frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j}$ – первые и вторые

производные гравитационного потенциала. Подставив (1) и (3) в (2) и пренебрегая членами, связанными с гравитационными градиентами, получим

$$L = \frac{1}{2} \int_M \left(\dot{\vec{r}} + [\vec{\Omega}, \vec{R}] \right)^2 dm - g_i \int_M (r_i + a_{ij} R_j) dm - U(\vec{r}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3).$$

Используя символ Леви-Чивита ε_{ijk} , тождество $[\vec{a}, \vec{b}]^2 = a^2 b^2 - (\vec{a}, \vec{b})^2$, и обозначив $\dot{r}_i = v_i$, получим

$$L = \frac{M v_i^2}{2} + M \rho_k \left(\varepsilon_{ijk} v_i \Omega_j - g_i a_{ik} \right) + \frac{\Omega_i \Omega_j I_{ij}}{2} - M g_i r_i - U(\vec{r}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), \quad (4)$$

$$\rho_j = \frac{1}{M} \int_M R_j dm, \quad I_{ij} = \int_M (R_k^2 \delta_{ij} - R_i R_j) dm,$$

где ρ_j ($j = 1, 2, 3$) – координаты центра масс ПТ, I_{ij} – тензор инерции ПТ. Тензор инерции симметричен: $I_{ij} = I_{ji}$, и, следовательно, может быть приведен к диагональному виду путем соответствующего выбора направлений осей $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$. В этом случае

$$\frac{1}{2} \Omega_i \Omega_j I_{ij} = \frac{1}{2} (I_1 \Omega_1^2 + I_2 \Omega_2^2 + I_3 \Omega_3^2), \quad (5)$$

где I_1, I_2, I_3 – главные моменты инерции. Распишем остальные слагаемые, входящие в функцию Лагранжа в явном виде:

Кудряш Андрей Андреевич – ВГТУ, аспирант, тел. 8(473)246-42-22

Шунин Геннадий Евгеньевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, профессор, тел. 8(473)246-42-22

Ястребков Виктор Николаевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473)246-42-22

$$\varepsilon_{ijk} v_i \Omega_j \rho_k = \begin{vmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \\ \Omega_1 & \Omega_2 & \Omega_3 \\ \rho_1 & \rho_2 & \rho_3 \end{vmatrix} = \rho_1 (v_2 \Omega_3 - v_3 \Omega_2) - \\ - \rho_2 (v_1 \Omega_3 - v_3 \Omega_1) + \rho_3 (v_1 \Omega_2 - v_2 \Omega_1);$$

$$M g_i r_i = M (g_1 r_1 + g_2 r_2 + g_3 r_3); \quad (6)$$

$$g_i a_{ik} \rho_k = g_1 (a_{11} \rho_1 + a_{12} \rho_2 + a_{13} \rho_3) + \\ + g_2 (a_{21} \rho_1 + a_{22} \rho_2 + a_{23} \rho_3) + g_3 (a_{31} \rho_1 + a_{32} \rho_2 + a_{33} \rho_3).$$

Если в качестве углов поворота φ_i , характеризующих вращение подвижной системы координат относительно неподвижной, выбрать углы Эйлера, то компоненты вектора угловой скорости $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ по подвижным осям $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ выражаются через углы Эйлера и их производные [3]:

$$\Omega_1 = \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_1 - \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1, \\ \Omega_2 = \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_2 \sin \varphi_1, \quad (7) \\ \Omega_3 = \dot{\varphi}_3 \cos \varphi_2 + \dot{\varphi}_1.$$

Далее будем рассматривать аксиально-симметричное ПТ с $I_1 = I_2 = I$.

Поместим начало подвижной системы координат в центр приложения подъемной силы, действующей со стороны катушек магнитного подвеса на ПТ. Пусть ось \vec{l}_3 совпадает с направлением ускорения силы тяжести и, кроме того в начальный момент времени оси \vec{e}_3 и \vec{l}_3 совпадают с осью аксиальной симметрии подвеса. Тогда $g_1 = g_2 = 0$ и в силу аксиальной симметрии подвеса $\rho_1 = \rho_2 = 0$, что приводит, при учёте выражений (4) - (7), к следующему выражению для функции Лагранжа:

$$L = \frac{1}{2} M (v_1^2 + v_2^2 + v_3^2) + M g_3 \rho_3 \cos \varphi_2 - M g_3 r_3 + \\ + M \rho_3 v_1 (\dot{\varphi}_2 \cos \varphi_1 + \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_2 \sin \varphi_1) - \\ - M \rho_3 v_2 (\dot{\varphi}_2 \sin \varphi_1 - \dot{\varphi}_3 \sin \varphi_2 \cos \varphi_1) + \\ + \frac{1}{2} I (\dot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_3^2 \sin^2 \varphi_2) + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\varphi}_3 \cos \varphi_2 + \dot{\varphi}_1)^2 - \\ - U(r_1, r_2, r_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3). \quad (8)$$

Рассмотрим теперь чувствительный элемент со сферическим ПТ. Найдем зависимость потенциальной энергии $U(r_1, r_2, r_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ от токов и индуктивностей сверхпроводящих цепей. Пусть магнитный подвес состоит из одной сверхпроводящей цепи $L_1 L_2$ с током I_0 . При этом ПТ находится только в магнитном поле катушки L_1 , а катушка L_2 удалена от пробного тела и закрыта сверхпроводящим магнитным экраном. Тогда потенциальная энергия будет иметь вид [4]

$$U(r_1, r_2, r_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = \\ = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{L_1(r_1, r_2, r_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) + L_2}. \quad (9)$$

Здесь Φ – магнитный поток, захваченный в цепи, L_1 и L_2 – соответственно индуктивности первой и второй катушек.

Для упрощения дальнейших расчетов предположим, что ПТ имеет сферическую форму, а катушка L_1 обладает аксиальной симметрией. Поместим начало подвижной системы координат в центр приложения подъемной силы, действующей со стороны катушки L_1 на ПТ. Тогда L_1 не зависит от углов поворота ПТ $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, так как вращение ПТ не изменяет индуктивности. Очевидно, что в силу аксиальной симметрии подвеса зависимость индуктивности L_1 от смещений ПТ по осям \vec{l}_1 и \vec{l}_2 может быть только четной. В этом случае, при малых смещениях ПТ от положения равновесия, с точностью до членов третьего порядка малости зависимость индуктивности от координат имеет вид

$$L_1 = L_0 + L'_3 (r_3 - r_{30}) + \frac{1}{2} L''_{11} r_1^2 + \frac{1}{2} L''_{22} r_2^2 + \\ + \frac{1}{2} L''_{33} (r_3 - r_{30})^2 + \frac{1}{2} L'''_{113} r_1^2 (r_3 - r_{30}) + \\ + \frac{1}{2} L'''_{223} r_2^2 (r_3 - r_{30}) + \frac{1}{6} L'''_{333} (r_3 - r_{30})^3, \quad (10)$$

где L_0 – значение индуктивности L_1 в равновесном положении ПТ с координатами $(0, 0, r_{30})$; L'_3 – значение первой производной индуктивности L_1 по координате r_3 , взятое в равновесном положении; $L''_{11}, L''_{22}, L''_{33}, L'''_{113}, L'''_{223}, L'''_{333}$ – значения вторых и третьих производных L_1 соответственно по координатам r_1, r_2, r_3 , взятые также в равновесном положении.

Учитывая, что для сферического ПТ $I_3 = I$, $\rho_3 = 0$, $r_1^2 + r_2^2 = r^2$, $v_1^2 + v_2^2 = v^2$, $L_{11} = L_{22} = L_{rr}$, $L_{113} = L_{223} = L_{rr3}$, из выражений (8), (9) и (10) получаем следующее выражение для функции Лагранжа с точностью до членов третьего порядка по обобщённым координатам

$$L = \frac{1}{2} m (v^2 + v_3^2) + \frac{1}{2} I (\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_3^2 + 2\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 \cos \varphi_2) - \\ - m g_3 r_3 + \frac{1}{2} I_0^2 L'_3 (r_3 - r_{30}) + \frac{1}{4} I_0^2 L''_{rr} r^2 - \\ - \frac{1}{2} I_0^2 \left(\frac{L_3^2}{L_0 + L_2} - \frac{1}{2} L''_{33} \right) (r_3 - r_{30})^2 - \\ - \frac{1}{2} I_0^2 \left(\frac{2L'_3 L''_{rr}}{L_0 + L_2} - \frac{1}{2} L'''_{rr3} \right) r^2 (r_3 - r_{30}) - \\ - \frac{1}{6} I_0^2 \left(\frac{3L'_3 L''_{33}}{L_0 + L_2} - \frac{3L_3^3}{(L_0 + L_2)^2} - \frac{1}{2} L'''_{333} \right) (r_3 - r_{30})^3.$$

Динамика ПТ описывается системой уравнений Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_n} + \frac{\partial Q}{\partial \dot{q}_n} = 0, \quad (n = 1, \dots, 6), \quad (11)$$

где q_n и \dot{q}_n соответственно обобщённые координаты и скорости ПТ, а Q – диссипативная функция.

Для диссипативной функций можно принять следующую модель [3]

$$Q = \frac{1}{2} (Hr^2 + H_3\dot{r}_3^2 + N_1\dot{\phi}_1^2 + N_2\dot{\phi}_2^2 + N_3\dot{\phi}_3^2), \quad (12)$$

где H_i и N_i - коэффициенты трения ($i = 1, 2, 3$).

Подставив (7) и (9) в (8) и вычислив, производные получим нелинейную систему уравнений

$$\begin{cases} \ddot{z} + 2h_z\dot{z} + \omega_z^2 z = \Delta g + ar^2 + bz^2, \\ \ddot{r} + 2h_r\dot{r} + \omega_r^2 r = 2arz. \end{cases} \quad (13)$$

В ней введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} z &= r_3 - r_{30}; \quad \Delta g = g - g_0; \quad g_0 = -\frac{1}{2m} I_0^2 L'_z; \\ h_z &= \frac{H_3}{2m}; \quad h_r = \frac{H}{2m}; \quad \omega_z^2 = \frac{1}{m} I_0^2 \left(\frac{L'_z{}^2}{L_0 + L_2} - \frac{1}{2} L''_{zz} \right); \\ \omega_r^2 &= -\frac{1}{2m} I_0^2 L''_{rr}; \quad a = -\frac{1}{2m} I_0^2 \left(\frac{2L'_z L''_{rr}}{L_0 + L_2} - \frac{1}{2} L'''_{rrz} \right); \\ b &= -\frac{1}{2} I_0^2 \left(\frac{3L'_z L''_{zz}}{L_0 + L_2} - \frac{3L'_z{}^3}{(L_0 + L_2)^2} - \frac{1}{2} L'''_{zzz} \right). \end{aligned}$$

Уравнения движения ПТ по угловым степеням свободы ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 не рассматривались, так как они не вносят вклада в измерительную степень свободы z при выполнении условия $\rho_3 = 0$.

В общем случае система из шести дифференциальных уравнений, описывающая динамику левитирующего пробного тела, была получена в работе [4]. В матричной форме она может быть записана в виде

$$\ddot{X} + A\dot{X} + BX = f(X, \dot{X}),$$

где X – вектор-столбец отклонений размерностью (6×1) , A – диагональная матрица (6×6) коэффициентов вязкости, B – диагональная матрица (6×6) коэффициентов жёсткости, f – вектор-функция (6×1) , описывающая гравитационные силы, нелинейности и перекрёстные связи.

Для решения такой системы дифференциальных уравнений в Scilab [5] необходимо свести её к системе дифференциальных уравнений первого порядка путём замены

$$\dot{X} = Y.$$

В результате система будет иметь вид

$$\begin{cases} \dot{X} = Y, \\ \dot{Y} = -AY - BX + f(X, Y). \end{cases}$$

Таким образом, система из шести уравнений 2-го порядка сводится к системе из 12 уравнений

Воронежский государственный технический университет

SIMULATION OF MOVEMENT OF A TRIAL BODY OF CRYOGENIC GRAVIMETER

A.A. Kudryash, G.E. Shunin, V.N. Yastrebkov

Nonlinear system of the equations of motion for the spherical trial body of cryogenic gravimeter was obtained within Lagrange formalism. A program for numerical solution of this system of six differential equations of second order was developed in the system of computer mathematics Scilab

Key words: equations of motion, trial body, cryogenic gravimeter, program, modeling

первого порядка, которую уже можно решать с помощью функций Scilab.

Разработанная скрипт-программа состоит из файла-сценария с расширением *sce* и двух файлов с расширением *sci*, в одном из которых содержатся функции, описывающие динамику рассматриваемого тела, а в другом – функции, отвечающие за создание графического интерфейса.

В файле-сценарии задаются начальные условия для решения системы дифференциальных уравнений и графические параметры (создаётся графическое окно, задаются свойства графических осей и изображается исследуемое тело). После этого вызывается функция, реализующая соответствующий графический интерфейс.

Что касается двух *sci*-файлов, то в одном из них описывается динамика исследуемого тела (другими словами, в нём записывается правая часть системы дифференциальных уравнений), а также описываются матрицы взаимной ориентации двух ортогональных систем, выраженные через углы Эйлера. Другой файл содержит описание функций, отвечающих за графический интерфейс: функций, создающих контур изображаемого тела; функций, отображающей тело в графическом окне; функций, создающих анимацию и управляющие элементы.

Для тестирования функционирования программы исходная система уравнений была упрощена и сведена к следующему виду:

$$\ddot{q}_i + a_{i1}\dot{q}_i + a_{i2}q_i = c_i \sin(2\pi t),$$

где $i = 1, \dots, 6$.

Эта система решалась при различных значениях коэффициентов, и результаты численных расчётов сравнивались с аналитическими решениями. Разность между аналитическим и численным решением имеет порядок 10^{-9} . С помощью этой программы можно осуществлять компьютерное моделирование динамики ПТ криогенного гравиметра при заданных числовых значениях коэффициентов в уравнениях движения и в начальных условиях.

Литература

1. Жернаков О.А. Современное состояние и перспективы развития зарубежной гравиметрической техники / О.А. Жернаков, Д.А. Егоров // Гирскопия и навигация. – 1998. – № 1(20). – С. 35-47.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. – М.: Наука, 1973. – 208 с.
3. Селезнев В.П. Навигационные устройства. – М.: Машиностроение, 1974. – 600 с.
4. Шунин Г.Е., Ястребков В.Н. Динамика пробного тела криогенного гравиметрического датчика // Известия АН. Сер. Физ. 1997. Т.61. №5. С.972-980.
5. Описание программы Scilab. – Электрон. дан. - Режим доступа: <http://www.scilab.org>

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.П. Полуэктов, В.С. Струков, С.О. Цолетан

Представлены результаты исследования возможных путей повышения точности измерения высотно-скоростных параметров движения объекта относительно воздушной среды путем изменения конструкции приемника воздушных давлений с использованием современных исследовательских программных комплексов. Предметом исследования являются математические модели современных приемников воздушных давлений. Представлены результаты сравнительного анализа классического и проектируемого приемников воздушных давлений. Обоснованы изменения, вводимые в конструкцию проектируемого измерителя воздушных давлений

Ключевые слова: полное давление, статическое давление, высотно-скоростные параметры, приемник воздушных давлений

Введение

Выходные сигналы большинства измерительных устройств о физических параметрах, характеризующих движение объекта относительно воздушной среды, вырабатываются на основе косвенных измерений. При этом входными величинами для указанных устройств являются статическое и полное давления набегающего воздушного потока, которые функционально связаны с измеряемыми величинами. От точности их измерения зависит и точность вычисления высотно-скоростных параметров (ВСП) объекта.

Традиционно статическое и полное давления определяются с помощью приемника воздушных давлений (ПВД), а углы атаки и скольжения – соответствующими датчиками (чаще всего потенциометрическими). Такому способу определения параметров присущи погрешности, которые значительно увеличиваются для высокоманевренных объектов.

Поэтому одним из приоритетных направлений развития систем измерения ВСП является разработка и совершенствование датчиков аэрометрических параметров полета, то есть датчиков первичной информации, непосредственно воспринимающих физическое воздействие набегающего воздушного потока. Такие датчики обеспечивают определение как кинематических параметров (величина и направление вектора скорости полета), так и параметров воздушной среды (статического и полного давлений, температуры). Набор функций, выполняемых такими устройствами, определяется целесообразностью их применения на конкретном объекте с учетом требований по отказобезопасности, глубине резервирования,

аппаратной независимости каналов измерения и особенностей аэродинамики [1, 2].

Характеристики существующих бортовых ПВД обладают сложной систематикой и требуют использования специфического математического аппарата для описания. Это связано с влиянием аэродинамических углов и скоростей в месте установки бортового приемника на распределение местных полей полного и статического давлений, что приводит к отличию измеренных давлений от их действительных значений.

Целью работы является проектирование ПВД с минимальными аэродинамическими погрешностями в каналах измерения полного и статического давлений.

1. Постановка задачи

Наиболее существенные погрешности в измерении параметров движения объекта относительно воздушной среды оказывают аэродинамические и волновые искажения давления у статических отверстий ПВД.

На дозвуковых скоростях перед объектом всегда образуется зона повышенного давления воздуха (сжатие воздуха). Величина сжатия зависит от скорости движения объекта, от его формы и от удаления зоны сжатия от передней кромки: чем больше скорость и чем ближе к самолету эта зона повышенного давления, тем больше величина сжатия. С целью уменьшения влияния сжатия воздуха ПВД с помощью штанги может выноситься на некоторое удаление вперед от объекта. Однако зона повышенного давления перед объектом может быть настолько велика, что вынести ПВД на штанге за ее пределы не удастся, поэтому в статические камеры ПВД поступает повышенное давление. Поправки к измеренным значениям скорости и высоты, вызванные повышением статического давления перед объектом, называют аэродинамической поправкой скорости и аэродинамической поправкой высоты.

На больших дозвуковых скоростях движения перед объектом возникает отсоединенная ударная волна. По мере увеличения скорости движения

Полуэктов Сергей Павлович – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, тел. (910) 3432501, e-mail: poluektov.sp@mail.ru
Струков Владимир Сергеевич – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, тел. (910) 3406014, e-mail: vsst1961@mail.ru
Цолетан Сергей Олегович – ВУНЦ ВВС «ВВА», тел. (952) 1097499, e-mail: coletan_92@mail.ru

ударная волна приближается к объекту. За ударной волной искажается полное и, особенно сильно, статическое давление. Погрешности в измерении скорости и высоты движения, обусловленные влиянием ударной волны, называются волновыми. Наибольшее изменение давления, воспринимаемого ПВД, происходит в момент прохода волновой зоной статических отверстий ПВД. Обычно это происходит на числах $M=0,95-0,96$. После прохода ударной волной статических отверстий ПВД аэродинамические и волновые погрешности исчезают, так как возмущения воздушного потока от объекта распространяются до головной ударной волны.

Величины аэродинамических и волновых погрешностей в значительной степени зависят от геометрических особенностей объекта, места установки ПВД и конструкции самого ПВД.

Для снижения погрешностей восприятия статического и полного давлений широко применяется аэродинамический способ компенсации. Данный способ заключается в изменении формы ПВД, позволяющий уменьшить погрешности измерения рассматриваемых давлений.

Также применяется способ учета и компенсации аэродинамических погрешностей [3]. В процессе исследования ПВД в аэродинамической трубе погрешности могут быть определены, а в дальнейшем – составлены графики и таблицы поправок к показаниям аэрметрических приборов. Данные поправки можно применить к показаниям аэрметрических приборов посредством приборного способа компенсации и алгоритмической компенсации в системе воздушных сигналов.

Приборный способ заключается в конструктивном изменении приборов с целью корректировки показаний с учетом поправок (применение противовесов, компенсаторов, балансировка подвижных элементов и т.д.). Однако, приборный способ не обеспечивает централизованную компенсацию ошибок всех высотно-скоростных параметров на борту воздушного судна, а также ведет к усложнению конструкции приборов и к снижению надежности.

Алгоритмическая компенсация является более перспективным методом, основанным на использовании вычислительной техники для внесения необходимых поправок в показания приборов. Достоинством данного способа является то, что он не приводит к усложнению приборов и позволяет реализовать сложные алгоритмы при внесении поправок.

Наиболее эффективным способом, по мнению авторов статьи, является комбинированный путь, сочетающий в себе достоинства аэродинамического и алгоритмического способов компенсации аэродинамической погрешности. В рамках данной статьи рассматривается аэродинамический способ компенсации погрешности измерения давления, который направлен на повышение точности восприятия статического и полного давления за счет изменения конструкции приемника.

2. Моделирование датчика первичной информации

В роли прототипа проектируемого приемника воздушных давлений был взят широко распространенный современный комбинированный приемник ПВД-18-3М сер. 2 с аэродинамическим компенсатором. Данный приемник воздушных давлений имеет на боковой поверхности три группы отверстий для приема статического давления и одно отверстие в носовой части для приема полного давления (рис. 1).



Рис. 1. Приемник воздушных давлений ПВД-18-3М сер. 2

При этом группа отверстий для приема статического давления, расположенная на аэродинамическом компенсаторе (небольшое утолщение на цилиндрической части приемника), предназначена для измерения статического давления в дозвуковом диапазоне. Наличие аэродинамического компенсатора у приемника позволяет уменьшить ошибку измерения статического давления на дозвуковых скоростях движения.

Недостатком данного ПВД является недостаточно высокая точность восприятия полного и статического давлений, обусловленная значительными аэродинамическими погрешностями в сверхзвуковом диапазоне скоростей. Следовательно, в рассматриваемом режиме движения объекта повышается вероятность ошибочного определения таких важных параметров, как высота и скорость. Данный вывод можно наглядно проиллюстрировать с помощью известных зависимостей [4], используемых современными бортовыми комплексами для вычисления абсолютной барометрической высоты

$$H_{абс} = f_{H_{абс}}(P_{cm}),$$

$$\text{где } H_{абс} = \frac{T_c}{\beta_1} \left[\left(\frac{P_{cm}}{P_0} \right)^{\frac{R\beta_1}{g_c}} - 1 \right] \text{ для } H_{абс} \leq 11 \text{ км,}$$

$$H_{абс} = 11\,000 + \frac{RT_{11}}{g_c} \ln \frac{P_{11}}{P_{cm}} \text{ для } 11 \text{ км} \leq H_{абс} \leq 20 \text{ км,}$$

$$H_{абс} = 20\,000 + \frac{T_{20}}{\beta_2} \left[\left(\frac{P_{cm}}{P_{20}} \right)^{\frac{R\beta_2}{g_c}} - 1 \right] \text{ для } 20 \text{ км} \leq H_{абс} \leq 32 \text{ км,}$$

P_{cm} – измеряемое статическое давление, P_0 – стандартное статическое давление на уровне моря (760 мм рт. ст.), T_c – стандартная температура воздуха на уровне моря (288,15 К), P_{11} , T_{11} – статическое давление и температура воздуха по СА-

81 на высоте 11 км (169,75 мм рт. ст. и 216,65 К соответственно), P_{20} , T_{20} – статическое давление и температура воздуха по СА-81 на высоте 20 км (41,065 мм рт. ст. и 216,65 К соответственно), β_1 – градиент температуры воздушного слоя до 11 км ($-6,5 \cdot 10^{-3}$ К/м), β_2 – градиент температуры воздушного слоя свыше 20 км (10^{-3} К/м), R – удельная газовая постоянная (для воздуха $287,05287$ Дж·(К·кг) $^{-1}$), g_c – стандартное ускорение силы тяжести ($9,8$ м/с 2).

Таким образом, повышение точности измерения статического и полного давлений во всем диапазоне высот и скоростей позволит определять с требуемой точностью и высотно-скоростные параметры движения объекта.

В качестве основного инструмента в ходе проведения имитационного моделирования активно использовались программные комплексы SolidWorks и ANSYS CFX. В программном комплексе SolidWorks были построены трехмерные модели приемников воздушных давлений, которые в дальнейшем внедрялись в исследовательский комплекс ANSYS CFX для моделирования процесса обтекания их воздушным потоком на высотах 5000, 10000 и 15000 метров в условиях изменения чисел Маха в диапазоне от 0 до 2,2 единиц и угла атаки от 0 до 30 градусов. В результате эксперимента были получены точностные характеристики измерительного канала по статическому и полному давлению исследуемых моделей приемников воздушных давлений (типового и нескольких вариантов проектируемого датчика).

Анализ эффективности измерительных каналов давления проектируемого приемника воздушных давлений выполнялся путем сопоставления его характеристик с точностными характеристиками приемника ПВД-18-3М сер. 2.

Качество восприятия статического давления оценивалось по величине относительной аэродинамической погрешности

$$\delta_c = \frac{\Delta P_c}{P_{c-p}},$$

где $\Delta P_c = P_{c-и} - P_{c-p}$ – ошибка восприятия статического давления, $P_{c-и}$ – измеренное статическое давление, P_{c-p} – расчетное статическое давление.

В роли параметра, характеризующего качество измерения полного давления, принято использовать коэффициент восстановления полного давления [5, 6], который определяется как отношение давлений торможения в рассматриваемых сечениях трубки тока

$$\nu = \frac{P_2}{P_1},$$

где поток направлен от сечения 1 к сечению 2.

Для пояснения связи с используемым при моделировании программным обеспечением давлений в сечениях приемника 1 и 2 были

присвоены идентификационные наименования (измеренное давление и расчетное давление). При этом под измеренным давлением ($P_{П.изм}$) понимается давление, воспринятое приемником воздушного давления (непосредственно после камеры полного торможения воздушного потока), то есть это давление соответствует давлению P_2 . Под расчетным давлением ($P_{П.расч}$) понимается заданное программой полное давление воздушного потока, не возмущенное приемником, соответствующее давлению P_1 .

В результате формула расчета коэффициента восстановления полного давления приняла следующий вид

$$\nu = \frac{P_{П.изм}}{P_{П.расч}}.$$

Чем ближе значение данного параметра к единице, тем меньше погрешность восприятия полного давления.

В связи с тем, что в приемнике ПВД-18-3М сер. 2 задача уменьшения ошибки восприятия статического давления уже частично решена для дозвукового диапазона скоростей (наличие аэродинамического компенсатора), то и основные усилия авторов были направлены на исследование возможности повышения точности данного измерителя в сверхзвуковом диапазоне.

С этой целью предлагается внести ряд изменений в конструкцию рассматриваемого прототипа, а именно модифицировать камеру статического давления, находящиеся на цилиндрической части приемника (сверхзвуковые), и изменить входное отверстие для приема полного давления.

Первичная камера полного давления предлагаемой формы обеспечивает предварительное торможение воздушного потока, что способствует формированию плавных аэродинамических нагрузок внутри камеры полного торможения даже при резком изменении давления набегающего воздушного потока. В результате в измерительной магистрали формируется полное давление с минимальными искажениями, особенно в сверхзвуковом диапазоне скоростей и при резком изменении углов атаки.

Продольную ось двух групп входных каналов в кольцеобразные камеры статического давления приемника предлагается наклонить относительно продольной оси приемника на угол 65 градусов в сторону его хвостовой части. Традиционно продольная ось входных отверстий статического давления наклонена под углом 90 градусов по отношению к продольной оси ПВД. При изменении угла наклона продольной оси входных отверстий с 90 на 65 градусов изменяются аэродинамические качества приемника, позволяющие обеспечить формирование давления в статической камере приемника без скачков уплотнений даже в сверхзвуковом диапазоне скоростей, что в итоге приводит к повышению точности восприятия статического давления.

В эксперименте использовалась модель турбулентности Shear Stress Transport (SST) со степенью турбулентности потока 5% при общем количестве элементов (Total Number of Elements) расчетной сетки около 3 000 000 ячеек.

Для учета воздушного потока в непосредственной близости от приемных отверстий измерителя особое внимание было уделено моделированию пограничного слоя. Рассматриваемый слой построен с использованием тетраэдральной сетки (рис. 2) со следующими параметрами: Inflation Option – Total Thickness, количество слоев (Number of Layers) – 4 шт., максимальная толщина грани (Maximum Thickness) – 0,1 мм.

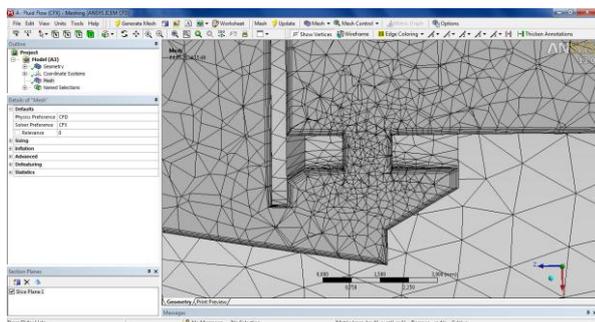


Рис. 2. Пограничный слой в камере полного торможения ПВД

Столь малая величина толщины грани обусловлена наличием в конструкции ПВД отверстий малого диаметра – отверстий для забора статического давления, а также дренажного отверстия. Общее число элементов расчетной сетки достигает приблизительно 3 млн. ячеек, что предъявляет соответствующие требования к аппаратной части ЭВМ при выполнении имитационного моделирования.

3. Анализ полученных результатов

Полученные в ходе исследования результаты наглядно иллюстрируются с помощью графиков изменения относительной аэродинамической погрешности и коэффициента восстановления полного давления проектируемого ПВД в исследуемом диапазоне высот, скоростей и углов атаки.

С целью выяснения преимуществ и недостатков проектируемого ПВД был проведен сравнительный анализ его точностных характеристик с результатами исследований приемника ПВД-18-3М сер. 2. Часть результатов выполненного анализа для высоты 10 000 метров представлена на рис. 3.

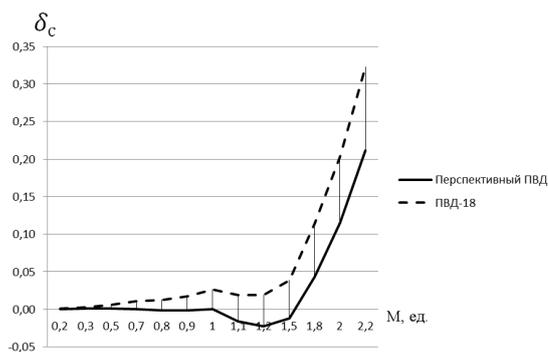


Рис. 3. График изменения относительной аэродинамической погрешности для угла атаки 30°

Как видно из графика, канал измерения статического давления проектируемого ПВД (камеры С1 и С2) обладает большей точностью восприятия измеряемого параметра по сравнению с приемником ПВД-18-3М сер. 2. Изменение конструкции приемника привело к снижению конструктивной аэродинамической погрешности особенно в сверхзвуковом диапазоне скоростей.

Выполненные исследования предлагаемого приемника в диапазоне углов атаки от 0 до 30 градусов при изменении числа Маха от 0,2 до 2,2 единиц позволяют гарантировать уменьшение погрешности в восприятии статического давления на 3,7%.

Результаты проведенных исследований также позволяют сделать вывод и о том, что предложенная форма носовой части приемника (для приема полного давления воздушного потока) является более эффективной в сравнении с приемником ПВД-18-3М сер.2. На рис.4 представлены графики изменения коэффициента восстановления полного давления проектируемого ПВД и ПВД-18-3М сер. 2 для угла атаки 15 градусов.

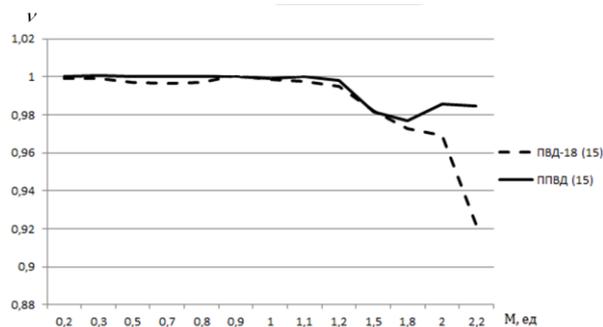


Рис. 4. График изменения коэффициента восстановления полного давления перспективного ПВД и ПВД-18 для угла атаки 15°

Как видно из рис. 4 канал измерения полного давления проектируемого ПВД обладает гораздо большей точностью восприятия полного давления по сравнению с приемником ПВД-18-3М сер. 2. Наибольшая эффективность получена для диапазона сверхзвуковых скоростей. Аналогичная картина

наблюдается во всем исследованном диапазоне углов атаки (от 0 до 30 градусов) при изменении числа Маха от 0,2 до 2,2 ед. и в результате обеспечивает повышение точности восприятия полного давления на 4%.

4. Выводы

Задача повышения точности измерения первичных параметров движения объекта относительно воздушной среды имеет различные пути решения. Авторы статьи предложили свой вариант решения рассматриваемой научной задачи с активным использованием современных исследовательских программных комплексов.

В результате применения имитационного моделирования с использованием программных комплексов SolidWorks и ANSYS получены точностные характеристики измерительных каналов полного и статического давлений различных приемников воздушных давлений (типового и нескольких вариантов проектируемого измерителя) при обтекании их воздушным потоком в диапазоне чисел Маха от 0,2 до 2,2 единиц при изменении угла атаки от 0 до 30 градусов. Представлены результаты сравнительного анализа классического и проектируемого приемников воздушных давлений. Обоснованы изменения, вводимые в конструкцию носовой части и измерительных каналов статического давления проектируемого приемника воздушных давлений.

Результаты работы позволяют рекомендовать предложенную модель приемника воздушных давлений к проведению дальнейшего комплекса исследований и испытаний.

Внедрение предложенных конструктивных изменений в измерительные каналы полного и статического давления комбинированного

приемника воздушных давлений ПВД-18-3М сер. 2 позволит воспринимать информацию о давлениях воздушного потока с наименьшими погрешностями, что в результате приведет к повышению точности определения высотно-скоростных параметров полета современными комплексами бортового радиоэлектронного оборудования маневренных воздушных судов в широком диапазоне высот, скоростей и углов атаки.

Литература

1. Олейник, А.И. Алгоритм вычисления истинных значений аэроматрических параметров полета самолета [Текст] / А.И. Олейник // Авиакосмическое приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 3-10.
2. Семенов, А.В. Алгоритм компенсации аэродинамической погрешности приемников статического давления и погрешности запаздывания в пневмотракте статического давления системы воздушных сигналов летательного аппарата [Текст] / А.В. Семенов, И.П. Ефимов. – 2005. – Деп. в ВИНТИ 28.02.2005, №280-В2005.
3. Семенов, А.В. К вопросу оценки помехозащищенности каналов приборной скорости и числа М в системах предупреждения критических режимов летательного аппарата в условиях турбулентности атмосферы [Текст] / А.В. Семенов, И.П. Ефимов. – 2005. – Деп. в ВИНТИ 28.02.2005, №279-В2005.
4. ГОСТ Р 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры [Текст]. – Введ. 1982-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 181 с.
5. ГОСТ 23199-78. Газодинамика. Буквенные обозначения основных величин [Текст]. – Введ. 1980-01-01 – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 5 с.
6. ГОСТ 23281-78 Аэродинамика ЛА. Термины, определения и буквенные обозначения [Текст]. – Введ. 1979-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 32 с.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», (г. Воронеж)

STUDY SENSOR TO SOURCE INFORMATION ABOUT AIRSTREAM BY METHOD OF SIMULATION MODELING

S.P. Poluektov, V.S. Strukov, S.O. Tsoletan

Presented results of the study of the possible ways of increasing to accuracy of the measurement high-altitude-speed parameter of the moving the object for air ambience by change to designs of the receiver of the air pressures with use modern exploratory programmer complex. The subjects of the study are a mathematical models modern receiver air pressures. Presented results of the benchmark analysis classical and designed receiver of the air pressures. Motivated change carried in design of the designed meter of the air pressures

Key words: full pressure, steady-state pressure, high-altitude-speed parameters, receiver of the air pressures

ЭФФЕКТИВНОЕ МНОГОПороГОВОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ НЕДВОИЧНЫХ КОДОВ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКОЙ ОШИБОЧНОСТИ ПРОВЕРОК

А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, А.В. Муратов

В данной статье представлено обобщение основных принципов многопорогового декодирования (МПД) на недвоичные коды. Показано, что эффективность недвоичного МПД близка к результатам, обеспечиваемым оптимальными переборными методами, которые для недвоичных кодов обычно нереализуемы. Рассмотрены вопросы сложности реализации предлагаемых декодеров

Ключевые слова: МПД, qМПД, низкоплотностные коды, многопороговый декодер самоортогональных кодов

В век высоких технологий для обеспечения наиболее значительных скоростей передачи данных существуют инновационные телекоммуникационные системы, которые требуют внедрения наиболее действенных методов помехоустойчивого кодирования. По сравнению с другими методами декодирования, в настоящее время более активно развиваются многопороговые декодеры (МПД) самоортогональных кодов (СОК). Представленные алгоритмы характеризуются небольшой сложностью реализации и при этом обладают довольно высокой энергетической эффективностью. Следует отметить, что при довольно высоком уровне шума и практически неограниченном быстродействии, многопороговые декодеры обеспечивают высокую достоверность передачи данных в каналах [1].

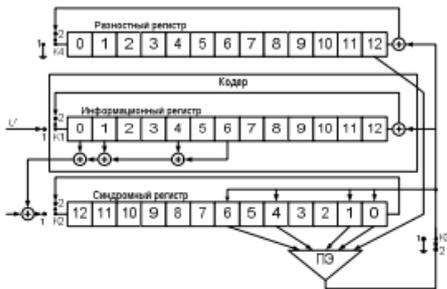


Рис. 1. Многопороговый декодер самоортогональных кодов

Принцип работы многопорогового декодера, изображенного на рис. 1, заключается в том, что задан сверточный самоортогональный код или двоичный линейный систематический блочный код, который используется для передачи сообщения

из k двоичных символов. После кодирования общее число кодовых символов равно n , $n > k$.

В результате передачи по двоичному симметричному каналу декодер получает искаженное шумами сообщение Y равный длине n , вместо кодового слова C_0 . В первую очередь, как и в обычном пороговом декодере, вычисляется синдром $S = YN^T$ принятого сообщения, и для каждого информационного символа i_j , $1 \leq j \leq k$, выделяется множество $\{S_{jk}\}$ элементов синдрома с номерами $\{j_k\}$, называемых проверками относительно символа u_j и содержащих в качестве слагаемого ошибку e_i в этом символе. Кроме того вводится двоичный вектор D длины k , именуемый разностным, элементы которого первоначально равны нулю. В этом регистре станут отмечаться измененные информационные символы для того, чтобы декодер запоминал принятое из канала сообщение и всегда мог вычислить разность между этим сообщением и кодовым словом, находящимся в информационном регистре. Главный этап декодирования заключается в том, что для произвольно взятого символа u_j вычисляется функция правдоподобия L_j , зависящая от относящихся к нему проверок S_{jk} и j -го элемента вектора D :

$$L_i = \sum_{j_k} S_{j_k} + d_j \tag{1}$$

Общее число слагаемых в формуле 1 равно минимальному кодовому расстоянию d . Если $L_j > T$, где $T = (d - 1) / 2$ – пороговое значение, то символ u_j , все проверки $\{S_{jk}\}$ и символ d_j инвертируются, после чего выбирается другой символ u_m , $m \neq j$, для него снова вычисляется сумма L_m и т.д. Если же $L_j \leq T$, то сразу осуществляется переход к очередному символу u_m .

Вплоть до недавнего времени в целом не существовало эффективных и одновременно довольно простых методов кодирования и декодирования недвоичных данных, кроме

Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 243-77-06, e-mail: kipr@vorstu.ru
 Свиридова Ирина Владимировна - ВГТУ, аспирант, тел. (473) 243-77-06, e-mail: kipr@vorstu.ru
 Муратов Александр Васильевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 243-77-06, e-mail: kipr@vorstu.ru

использования кодов Рида–Соломона. Недостатком коротких кодов Рида-Соломона до длины $n = 255$ символов является то, что они не обеспечивают необходимых в настоящее время уровней достоверности. В то время как декодеры для длинных кодов Рида–Соломона оказываются слишком сложными, и их возможное упрощение становится весьма проблематично. Поэтому, в последнее время зарубежные специалисты стремительно развивают декодеры двоичных низкоплотностных кодов. Данные методы обладают достаточно высокой корректирующей способностью, но они слишком сложны в реализации для применения в реальных системах, а особенно при больших размерах алфавита q . Ниже предложено обобщение МПД на двоичные симметричные каналы. Также показано, что двоичный аналог алгоритма МПД (q МПД) может обеспечить при крайне высоких уровнях шума вероятности ошибки декодирования, в ряде случаев вообще недоступные для кодов Рида–Соломона сколько угодно большой длины. При этом сложность реализации такого алгоритма будет весьма незначительной. Перейдем к более подробному описанию многопорогового алгоритма декодирования двоичных кодов [2]. Пусть задан q -ичный, $q > 2$, симметричный канал (q СК) с вероятностью ошибки $P_0 > 0$ такой, что при передаче любой исходный символ кода переходит в один из оставшихся $q-1$ символов случайно, независимо и равновероятно. Для q СК оптимальным решением при передаче любого сообщения будет такое, возможно единственное, кодовое слово из $q^n R$ возможных, которое отличается от принятого сообщения в минимальном числе символов кода (n – длина кода в символах, R – кодовая скорость, $R < 1$). Рассмотрим линейный двоичный систематический код, проверочная матрица H которого размером $(n - k) \times n$ имеет вид

$$H = [C: -I_{n-k}],$$

где k – длина информационной части кода; I_{n-k} – единичная матрица размером $(n - k) \times (n - k)$; C – матрица размером $(n - k) \times k$, состоящая из нулей и единиц, i -я строка которой определяет информационные символы, участвующие в i -й проверке; операция $[A:V]$ определяет матрицу, полученную объединением матриц A и V . Пусть матрица H соответствует двоичному самоортогональному коду. Поскольку проверочная матрица H кода содержит только 0, 1 и -1 , то операции кодера и декодера по

формированию проверочных символов кода и вычислению вектора синдрома S длиной $n - k$ принятого сообщения являются только сложениями и вычитаниями. Таким образом, для кодирования и декодирования не требуется наличие двоичного поля, а достаточно создать только любой вариант группы по сложению, например, все операции сложения и вычитания будут производиться в некоторой группе целых чисел по модулю q . Это очень существенно упрощает все процедуры кодирования и реализации последующего декодирования.

Пусть после передачи кодового вектора A длиной n с k информационными символами по q СК в декодер поступает вектор $Q = A + E$, где E – вектор ошибок. Будем, как и в двоичном случае, представлять каждый вектор – столбец X длиной n в виде пары векторов X_I и X_V длиной k и $(n - k)$ соответственно, т.е. $X = [X_I; X_V]$. Здесь операция $[A; B]$ определяет матрицу, полученную вертикальным объединением матриц A и B . Определим D как q -ичный вектор длиной k

$$D = A_I - Q_I, \quad (2)$$

где A_I – информационная часть переданного кодового слова $A = [A_I; A_V]$;

Q_I – информационная часть принятого сообщения $Q = [Q_I; Q_V]$.

Тогда справедлива следующая лемма:

$$[D; H \times [Q_I + D; Q_V]] = A - Q \quad (3)$$

Данная лемма устанавливает простое полезное соответствие между произвольным кодовым словом и принятым сообщением, аналогичное двоичному случаю [3]. Фактически она утверждает, что для рассматриваемых кодов вектор синдрома S является разностью по проверочным символам между принятым сообщением Q и кодовым вектором A с информационной частью A_I . Рассмотренная лемма позволяет доказать главное свойство q МПД алгоритма, которая заключается в следующем: пусть при передаче по q СК кодового слова A в декодер поступил искаженный в канале связи вектор $Q = A + E$. Аналогично двоичному случаю, разностный вектор D , теперь уже q -ичный, перед началом процедуры декодирования примем равным 0_I . Далее будем считать, что декодер q МПД устроен так, что после вычисления обычным образом вектора синдрома $S = H \times Q$ принятого сообщения процедура декодирования проходит по следующей схеме.

1. Для произвольно взятого q -ичного декодируемого информационного символа ij подсчитывается число двух наиболее часто

встречающихся значений проверок из общего числа J всех проверок, относящихся к символу ij , а также символа d_j вектора D , соответствующего символу ij . Пусть значения этих двух проверок равны h_0 и h_1 ($0 \leq h_0, h_1 \leq q$), а их количество равно m_0 и m_1 соответственно, причем $m_0 \geq m_1$. Эта процедура аналогична подсчету суммы проверок на пороговом элементе двоичного МПД.

2. Если $m_0 - m_1 \leq T$, где $T = 0, 1, 2, \dots$ – целое не отрицательное число, то осуществляется переход к новому произвольному $i_m, m \neq j$, и далее к п. 1. Это тоже аналог процедуры сравнения с порогом в двоичном декодере.

3. Если $m_0 - m_1 > T$, то из i_j, d_j и всех J проверок для i_j вычитается оценка ошибки, равная h_0 , затем происходит выбор нового $i_m, m \neq j$, и переход к п. 1.

Этот последний шаг цикла декодирования очередного символа есть просто процесс изменения декодируемого символа и коррекции через обратную связь всех символов синдрома, являющихся проверками относительно декодируемого символа. Нужно только учитывать, что, в отличие от двоичного МПД, процедуры сложения и вычитания в недвоичном МПД не тождественны. Такие попытки декодирования могут повторяться три, десять и более раз для каждого символа принятого сообщения. При реализации алгоритма недвоичного МПД, как и в двоичном случае, удобно все информационные символы пересортировывать последовательно, а прекращать процедуру декодирования после фиксированного числа попыток коррекции ошибок или если при очередной такой попытке ни один из символов не изменил своего значения [4].

Возможности символьных МПД алгоритмов становятся по вероятности ошибки и по числу операций декодирования значительно лучше, чем у кодов Рида–Соломона. Это определяется эффективным переносом идей двоичного многопорогового декодирования на очень просто организованные недвоичные коды сколь угодно большой длины. В результате недоступный ранее уровень помехоустойчивости, получаемый с помощью алгоритмов МПД разных типов, позволяет решать задачи обеспечения высокой надежности передачи и хранения данных без какой-либо дополнительной доработки этих алгоритмов или всего лишь при незначительной их адаптации к возможным дополнительным требованиям, возникающим в крупномасштабных цифровых системах.

Литература

1. Золотарёв, В. В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования [Текст] : учеб. пособие / В. В. Золотарев; под ред. Ю. Б. Зубарева. – Москва : Научная книга, 2006. – 266 с. - ISBN 978-5-9912-0351-7.
2. Золотарёв, В. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы [Текст] : учеб. пособие / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин; под ред. Ю. Б. Зубарева. – Москва : Справочное издание, 2004. – 126 с. - ISBN 5-93517-169-4.
3. Свиридова, И. В. Способы контроля помехозащищенности передачи данных [Текст] / И. В. Свиридова, И. В. Остроумов, А. В. Муратов // Труды международного симпозиума надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 17.
4. Золотарёв, В. В. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования [Текст] : учеб. пособие / В. В. Золотарёв, Ю. Б. Зубарев, Г. В. Овечкин; под ред. В. К. Левина. – Москва : Научная книга, 2012. – 239 с. - ISBN 978-5-9912-0235-0.

Воронежский государственный технический университет

EFFECTIVE MULTITHRESHOLD DECODING NON-BINARY CODES WITH A PRELIMINARY ESTIMATE OF ERRONEOUS INSPECTIONS

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, A.V.Muratov

This article presents a synthesis of the basic principles of multithreshold decoding (MTD) for non-binary codes . It is shown that the effectiveness of non-binary MTD is close to the results , provides an optimal exhaustive search methods, which for non-binary codes usually unrealizable . The problems of the complexity of proposed decoders

Key words: MTD qMTD , low-density codes, multithreshold decoder self-orthogonal codes

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОПОМЕХ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

И.В. Остроумов, М.А. Ромащенко

В статье приводятся исследования зависимости ослабления радиопомех за счёт их отстройки по частоте, полученной с помощью модели, имитирующей систему передачи дискретной информации. Представлен вариант многоточечных аппроксимаций для спектральной плотности мощности излучения передатчика и амплитудно-частотной характеристики приемника, использующих бинарные фазоманипулированные сигналы

Ключевые слова: радиопомех, система передачи дискретной информации, имитационная модель

Результаты, полученные с помощью модели [1], рассматриваются в качестве эталонных значений, на основе которых между собой сравнивались методики, использующие многоточечную и двухуровневую аппроксимации.

В методике, использующей двухуровневую аппроксимацию, представленной в [2], при расчёте норм частотно – территориального разнеса (ЧТР), нормированные по максимальному значению амплитудно частотные характеристики (АЧХ) и спектральная плотность мощности излучения (СПМИ) аппроксимируются следующим образом:

$$S(f) = \begin{cases} 1, & \text{при } |f| \leq \Delta f_{i1} \\ \exp\{-\alpha_t(|f| - \Delta f_{i1})\}, & \text{при } |f| > \Delta f_{i1} \end{cases} \quad (1)$$

$$K(f) = \begin{cases} 1, & \text{при } |f| \leq \Delta f_{r1} \\ \exp\{-\alpha_r(|f| - \Delta f_{r1})\}, & \text{при } |f| > \Delta f_{r1} \end{cases}$$

где $\Delta f_{i1}(\Delta f_{r1})$ – половина ширины СПМИ по уровню минус 3 дБ; $\Delta f_{i2}(\Delta f_{r2})$ – половина ширины СПМИ по уровню минус 30 дБ; $\alpha_t(\alpha_r)$ – вспомогательные величины, определяемые из соотношений:

$$\alpha_t = \frac{3 \ln 10}{\Delta f_{i2} - \Delta f_{i1}}; \quad \alpha_r = \frac{3 \ln 10}{\Delta f_{r2} - \Delta f_{r1}}. \quad (2)$$

Как представлено на рис.1, аппроксимации (1-2) имеют вид трапеций, для построения которых используются сведения о ширине

полосы излучения по уровням минус 3 и минус 30 дБ.

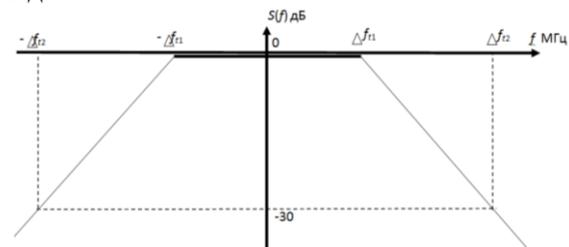


Рис. 1. Аппроксимация СПМИ передатчика по двум уровням измерения

В ходе сравнительных исследований рассматривались приемники бинарных фазоманипулированных сигналов (ФМн-2) как простых, так и сложных посылок, со значением базы сигнала 256. Непреднамеренные помехи представлены с длительностью элементарной посылки 0.5t, t и 5t и девиацией частоты 2/t, где t – длительность элементарной посылки полезного сигнала.

При получении аппроксимации спектральных характеристик сигналов для методик, использовалась модель формирования фазоманипулированных сигналов в радиопередающем устройстве [3] и основанная на ней методика определения ограничительной линии внеполосных излучений.

Для каждого вида сигналов были построены аппроксимации экспоненциальными линиями по двум уровням измерения (минус 3 и минус 60 дБ), а также ломаными, содержащими от 55 до 67 узловых точек. На рис.2 приведены полученные аппроксимации для сигнала ФМн-2. Пунктирной линией показана двухуровневая аппроксимация.

Различия аппроксимаций сказались на результатах расчетов функции зависимости ослабления непреднамеренных радиоэлектронных помех (НРП) от ее отстройки и от частоты настройки приемника. На рис. 3 показаны результаты построения

Остроумов Иван Владимирович – ВГТУ, аспирант,

тел. (473) 243-77-06, e-mail: kipr@vorstu.ru

Ромащенко Михаил Александрович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 243-77-06, e-mail: kipr@vorstu.ru

зависимости падения мощности сигнала на выходе приемника от частотной отстройки. СПМИ фазоманипулированного сигнала симметрична и близка к трапециидальной форме в логарифмическом масштабе.

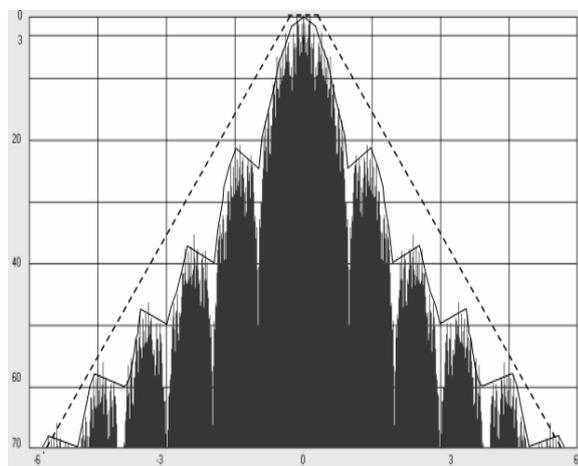


Рис. 2. Аппроксимации спектральной характеристики ФМн-2

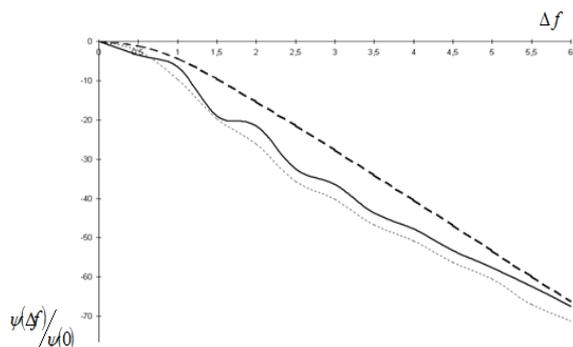


Рис. 3. Результат получения зависимости $\frac{\psi(\Delta f)}{\psi(0)}$ с помощью различных методик для приемников сигналов ФМн-2

На данном примере показаны достоинства и недостатки рассматриваемых методик. В случае, если модель выдает заниженные требования, не обеспечивающие электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС) в реальных условиях, есть возможность использовать поправки, устраняющие погрешность.

На рис.4 показаны результаты расчетов для функции $\frac{\psi(\Delta f)}{\psi(0)}$ зависимости от частотной отстройки падения мощности на выходе приемника сигналов ФМн-2 при воздействии частотно-манипулированной помехи.

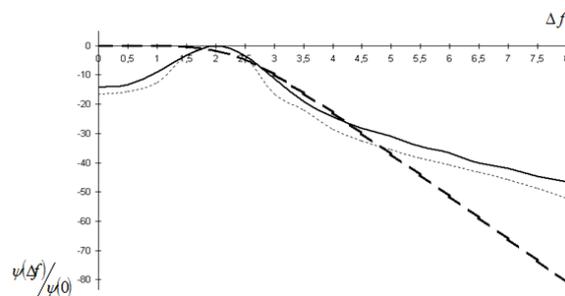


Рис. 4. Результат получения зависимости $\frac{\psi(\Delta f)}{\psi(0)}$ с помощью различных методик

Приведенные результаты наглядно показывают, что многоточечная аппроксимация позволяет построить нормы для ЧТР лучше согласующиеся с эталонными зависимостями [4], чем двухуровневая модель.

На рис.5 представлен результат получения зависимости $\frac{\psi(\Delta f)}{\psi(0)}$ с помощью различных методик для приемников сигналов ФМ-2 при аналогичной помехе при уточненной многоточечной аппроксимации СПМИ.

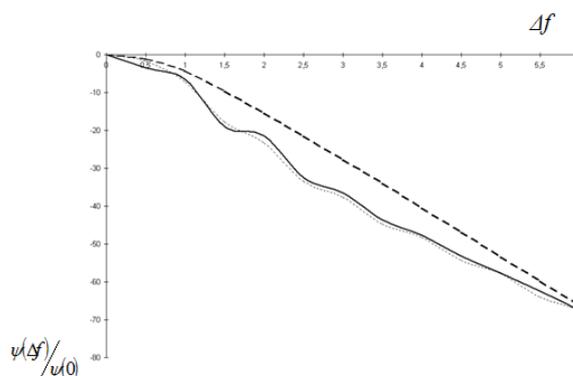


Рис. 5. График сравнительных расчетов

Таким образом, по результатам расчетов можно сделать вывод о том, что использование многоточечной аппроксимации увеличивает точность расчетов функции $\psi(\Delta f)$ по сравнению с методикой, использующей двухуровневую модель. Использование более точных результатов позволяет задать более точные требования по обеспечению ЭМС РЭС.

С целью проверки адекватности и актуальности предложенных изменений методики расчета норм ЧТР РЭС были рассчитаны нормы ЧТР, использующего сигналы ФМн-2 с длительностью элементарной посылки 2 мкс. Использование различных моделей спектральных характеристик влияет на значение требуемой отстройки при заданном

превышении мощности помехи над допустимым уровнем ΔP и территориальном разноразносе R , набор значений которых определяется на основе рассчитанного радиуса взаимовлияния R_{B3} , который в данном примере равен 67 км.

В таблице приведены результаты расчета необходимого значения отстройки несущей частоты рассматриваемого радиопередающего устройства от частоты основного канала приема радиоприемного устройства, записываемые в нормы ЧТР, соответствующие опорным расстояниям. Наглядно видно, что нормы ЧТР, рассчитанные с помощью многоточечных аппроксимаций СПМИ и АЧХ наиболее близки к эталонным нормам, полученным с помощью модели, имитирующей помеховые воздействия на систему передачи дискретной информации фазоманипулированными сигналами.

R, км	ΔP , дБ	Необходимое значение Δf по основному каналу приема, МГц	
		2-х уровневая	3-х уровневая
1.0	77	3.546	3.360
4.1	63	2.978	2.820
17	44	2.186	2.070
64	6.9	0.627	0.608

В этом случае погрешность не превышает 6% от требуемого значения частотного разноразноса, в то время, как у норм, рассчитанных с помощью 2-х уровневых аппроксимаций значение погрешности достигает 47%. Результаты, близкие к эталонным, получены при наличии достаточно подробных

сведений о СПМИ передатчика и АЧХ приемника. К сожалению, при решении практических задач ЭМС такие подробные сведения зачастую отсутствуют.

По результатам проведенных сравнительных расчетов можно сделать вывод о том, что использование предлагаемых изменений методики расчетов и формы представления норм ЧТР позволит получить уменьшение в отдельных случаях до 47 % необоснованно завышенных требований по необходимому частотному разноразносу и одновременно избежать ситуаций, когда вследствие методической погрешности требования задаются на 5-10% меньше необходимого значения, что позволит улучшить состояние ЭМС, одновременно снизив нагрузку на спектр.

Литература

1. Остроумов, И.В. Разработка имитационных моделей систем передачи дискретной информации с использованием простых и сложных фазо- и частотно-манипулированных сигналов [Текст] / И.В. Остроумов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 6. – С. 74 - 76.
2. Зюко, А.Г. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации [Текст] / А.Г. Зюко; под ред. А.Г. Зюко. – М. : Радио и связь, 1985. - 272 с.
3. Лаборатория ЭМС [Электронный ресурс] : Режим доступа : World Wide Web. URL : [http : // www. www.emc-problem.net](http://www.www.emc-problem.net).
4. Макаров, О.Ю. Основные принципы применения программных средств при решении задач обеспечения ЭМС и помехоустойчивости [Текст] / О.Ю. Макаров, М.А. Ромашенко // Издательство «Радиотехника». – 2013. - № 3. – С. 98-102.

Воронежский государственный технический университет

THE STUDY OF DEPENDENCY OF ATTENUATION OF INTERFERENCE IN SYSTEMS OF DISCRETE INFORMATION TRANSMISSION

I.V. Ostroumov, M.A. Romashenko

The article presents the study of the dependence of attenuation of interference at the expense of the detuning frequency, obtained by the model simulating the transmission system of discrete information. The presented variant of multi-point approximations for the spectral density of radiation power of the transmitter and the amplitude-frequency characteristics of the receiver using binary phase-shift signals

Key words: attenuation of interference, the system of discrete information transmission, simulation model

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ВЫПОЛНЕННОГО В СУБМИКРОННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ БАЗИСЕ

Д.В. Журавлёв, А.И. Мушта

Рассчитаны комбинационные составляющие промежуточной частоты и помеховой составляющей на выходе преобразователя частоты при наличии на его входе интенсивной гармонической помехи. Получены и аппроксимированы сток-затворные характеристики для МОП-транзисторов, выполненных в технологических базисах GPDК045, GPDК090. Разработан алгоритм и методика расчета синфазных компонент спектральных составляющих промежуточной частоты и помеховой составляющей на выходе преобразователя частоты при наличии на входе интенсивной помехи. Проведен анализ нелинейных процессов в преобразователе частоты и оценка эффективности преобразования с различными уровнями сигналов на входе преобразователя, в различных технологических базисах, с различными параметрами канала

Ключевые слова: МОП-транзистор, технологический базис, преобразование частоты

В дециметровом диапазоне волн помеха, образованная соседним каналом, практически не подавляется преселектором приёмника, поэтому актуальной остаётся задача определения нелинейных явлений в преобразователе при наличии на его входе интенсивной (порядка 80 дБ) гармонической помехи.

В реальном радиоприемнике вместе с полезным сигналом и сигналом гетеродина на нелинейном элементе преобразователя частоты всегда присутствует напряжение помехи. Цель работы заключается в проведении анализа нелинейных процессов и оценка эффективности преобразования с различными уровнями сигналов на входе преобразователя, в различных технологических базисах, с различными параметрами канала.

В общем случае преобразование частоты возможно в результате перемножения двух напряжений. Одним из них является напряжение гетеродина $x_1 = X_1 \cos \omega_r t$, а вторым принятый сигнал $x_2 = X_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2)$.

При перемножении напряжений сигнала и гетеродина появляются комбинационные составляющие частот [1]

$$x_1 x_2 = 0,5 X_1 X_2 \cos[(\omega_r \pm \omega_c)t + \varphi_1] \quad (1)$$

где X_1 - амплитуда колебаний напряжения гетеродина; X_2 - амплитуда колебаний напряжения сигнала; φ_1 и φ_2 - начальные фазы колебаний с частотами гетеродина и сигнала соответственно.

При наличии помехи к нелинейному элементу приложено воздействие

$$x = X_0 + X_1 \cos(\omega_r t + \varphi_1) + X_2 \cos(\omega_c t + \varphi_2) + X_3 \cos(\omega_{np} t + \varphi_3) \quad (2)$$

где X_0 - постоянная составляющая; X_1, X_2, X_3 - амплитуды колебаний напряжений гетеродина, сигнала и помехи соответственно; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - начальные фазы колебаний с частотами гетеродина, сигнала и помехи соответственно.

Далее определим комбинационную составляющую промежуточной частоты, являющуюся полезным результатом взаимодействия колебаний сигнала и гетеродина в присутствии помехи, а также выражение комбинационной помеховой составляющей, обусловленной присутствием на входе преобразователя гармонической помехи.

Пусть $\omega_c > \omega_r$, тогда

$$x = X_0 + X_1 \cos \tau + X_2 \cos[(1+A)\tau + \beta_2] + X_3 \cos[(1+A \pm AB)\tau + \beta_3 \pm] \quad (3)$$

где $\tau = \omega_r t + \varphi_1$; $A = \omega_{np} / \omega_r$; ω_{np} - промежуточная частота преобразования; $B = \Delta\omega / \omega_{np}$; $\Delta\omega$ - расстояние между соседними каналами; $\beta_2 = \varphi_2 - (1+A)\varphi_1$; $\beta_3 \pm = \varphi_3 - [1+A(1 \pm B)]\varphi_1$.

Нелинейная характеристика смесителя в интервале x задана в общем виде зависимостью $y = f(x)$. Токи в цепях смесителя как функции подводимых напряжений можно представить в виде разложения в ряды Тэйлора по степеням малых напряжений с отбрасыванием членов ряда с высокими степенями. Для выходного тока

$$y = f(X_1) + \frac{df(X_1)}{dX_2} X_2 + \frac{df(X_1)}{dX_3} X_3 + \dots \quad (4)$$

Здесь первое слагаемое представляет составляющую тока смесителя при действии напряжения гетеродина $y = f(X_1)$. Этот ток не содержит комбинационных составляющих, а имеет только компоненты с частотой гетеродина и его гармоник.

Спектр отклика представленный в символической форме, имеет вид

$$y = \sum_{p_1=-\infty}^{\infty} \sum_{p_2=-\infty}^{\infty} \sum_{p_3=-\infty}^{\infty} \left(I_{p_1} \left(X_1 \frac{d}{dX_0} \right) I_{p_2} \times \right. \\ \left. \times \left(X_2 \frac{d}{dX_0} \right) I_{p_3} \left(X_3 \frac{d}{dX_0} \right) f(X_0) \times \right. \\ \left. \times \exp j \left\{ p_1 \tau + p_2 [(1+A)\tau + \beta_2] + \right. \right. \\ \left. \left. + p_3 [(1+A(1\pm B))\tau + \beta_3 \pm] \right\} \right) \quad (5)$$

где $I_p(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{2n+p}}{(n+p)!n!}$ - модифицированная функция Бесселя (или функция Инфельда) 1-го рода p -го порядка.

Перемножив ряды в выражении (5) и отбрав составляющие с частотами $A\tau$ и $A(1\pm B)\tau$, после преобразований и подведения под знак дифференцирования функции $f(X_0)$ получим выражения компонент искомым спектральных составляющих:

$$y_{A\tau} = 2 \sum_{k_1=0}^{\infty} \sum_{k_2=0}^{k_1} \sum_{k_3=0}^{k_1-k_2} \left(\frac{d^{2k_1+2} f(X_0)}{dX_0^{2k_1+2}} \times \right. \\ \left. \frac{\left(\frac{X_1}{2} \right)^{2k_1-2k_2-2k_3+1}}{(k_1-k_2-k_3+1)!} \times \right. \\ \left. \times \frac{\left(\frac{X_2}{2} \right)^{2k_2+1} \left(\frac{X_3}{2} \right)^{2k_3}}{(k_1-k_2-k_3)!(k_2+1)!k_2!(k_3!)^2} \times \cos \beta_2 \right) \quad (6)$$

$$y_{A(1\pm B)\tau} = 2 \sum_{k_1=0}^{\infty} \sum_{k_2=0}^{k_1} \sum_{k_3=0}^{k_1-k_2} \left(\frac{d^{2k_1+2} f(X_0)}{dX_0^{2k_1+2}} \times \right. \\ \left. \frac{\left(\frac{X_1}{2} \right)^{2k_1-2k_2-2k_3+1}}{(k_1-k_2-k_3+1)!} \times \right. \\ \left. \times \frac{\left(\frac{X_2}{2} \right)^{2k_2} \left(\frac{X_3}{2} \right)^{2k_3+1}}{(k_1-k_2-k_3)!(k_2!)^2(k_3+1)!k_3!} \times \right. \\ \left. \times \cos \beta_3 \pm \right) \quad (7)$$

Так как p_k ($k=1,2,3$) в формуле (5) может принимать положительные и отрицательные значения, то

$$p_1 \tau + p_2 (1+A)\tau + \\ + p_3 [1+A(1\pm B)]\tau = \pm m \tau \quad (8)$$

где $m = A, A(1\pm B)$.

Определив из (8) значение p_1 и подставив его в (5), можно получить общее выражение составляющей с частотой $m\tau$. Результат суммирования в интервале от $-\infty$ до $+\infty$ не изменится, если в слагаемом соответствующем отрицательному значению m провести замену p_2 на $-p_2$ и p_3 на $-p_3$. Учитывая, что $I_p(z) = I_{-p}(z)$, формулы Эйлера, связывающие экспоненциальную и тригонометрические функции, выражение составляющей с частотой $m\tau$ можно записать в виде

$$y_{m\tau} = 2 \sum_{p_2=-\infty}^{\infty} \sum_{p_3=-\infty}^{\infty} \left(I_{m-p_2(1+A)-p_3[A(1\pm B)+1]} \left(X_1 \frac{d}{dX_0} \right) \times \right. \\ \left. \times I_{p_2} \left(X_2 \frac{d}{dX_0} \right) I_{p_3} \left(X_3 \frac{d}{dX_0} \right) \times \right. \\ \left. \times f(X_0) \cos(m\tau + p_2\beta_2 + p_3\beta_3 \pm) \right) \quad (9)$$

При выборке членов ряда (9) нужно учитывать, что величина $m - p_2(1+A) - p_3[A(1\pm B)+1]$ должна быть равна целому числу. В противном случае производная $d^v f(X_0)/dX_0^v$, где v - порядок модифицированной функции Бесселя, не имеет смысла.

Для определения спектральной составляющей с частотой $A(1\pm B)\tau$ подставим в (9) $m = A(1\pm B)$. Представив модифицированные функции Бесселя в виде рядов, получим

$$y_{A(1\pm B)\tau} = 2 \sum_{k_1=0}^{\infty} \sum_{k_2=0}^{k_1} \sum_{k_3=0}^{k_1-k_2} \left(\frac{\left(\frac{X_1}{2} \frac{d}{dX_0} \right)^{2k_1+1} \left(\frac{X_2}{2} \frac{d}{dX_0} \right)^{2k_2}}{(k_1+1)!k_1! (k_2!)^2} \times \right. \\ \left. \times \frac{\left(\frac{X_3}{2} \frac{d}{dX_0} \right)^{2k_3+1}}{(k_3+1)!k_3!} \times \right. \\ \left. \times f(X_0) \cos[A(1\pm B)\tau + \beta_3 \pm] \right) \quad (10)$$

Для расчета амплитуд составляющих выходных токов преобразователя частоты сначала необходимо аппроксимировать сток-затворную характеристику (функция $f(X_0)$) транзистора, используемого в преобразователе. Далее необходимо найти производные функции $f(X_0)$. Для достоверного определения каждой спектральной составляющей достаточно ограничиться производной 10-го порядка функции $f(X_0)$. Далее для

расчета амплитудных значений составляющей промежуточной частоты и помеховой составляющей остается только подставить полученные выражения в формулы (6) и (7) соответственно. Для получения достоверных результатов достаточно сумму по переменной k_1 проводить от 0 до 4.

Снимем реальные сток-затворные характеристики МОП транзисторов с индуцированным каналом п-типа, выполненных в типовых проектно-технологических нормах: GPDК045 (45н/120н) и (45н/360н), GPDК090 (100н/120н) и (100н/360н).

Для получения сток-затворных характеристик была использована система автоматизированного проектирования (САПР) Cadence IC 6.1.

«Cadence IC» – САПР, которая позволяет в единственной программной оболочке проводить моделирование и разработку интегральных схем в едином технологическом базисе.

Пакет программ Cadence IC включает в себя систему моделирования Virtuoso Spectre. Virtuoso Spectre - это современная система аналогового моделирования, использующая прямые методы моделирования на уровне дифференциальных уравнений.

Схема измерения сток-затворной характеристики nmos транзистора в программе Virtuoso Spectre представлена на рис. 1.

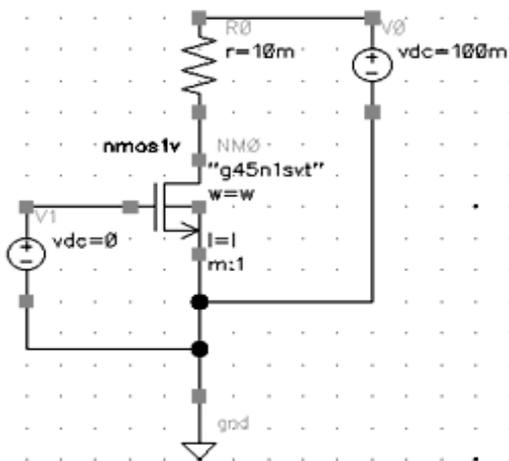


Рис. 1. Схема измерения сток-затворной характеристики

Нагрузочный резистор $r=10$ МОм в схеме позволяет определять величину тока стока транзистора при заданном значении напряжения смещения рабочей точки на затворе, изменяемом в пределах (0 – 2.2) В.

Алгоритм моделирования следующий:

- подключается источник постоянного напряжения VDC (V1), выполняющий функцию регу-

лируемого источника напряжения смещения для транзистора;

- подключается источник постоянного напряжения VDC=100 мВ (V0) между стоком и истоком транзистора;

- подключается нагрузочный резистор r в цепь стока для снятия значения тока, протекающего в цепи стока, так как в структуре транзистора начальная нагрузка не предусмотрена.

На рис. 2 представлены сток-затворные характеристики МОП-транзисторов для технологических процессов GPDК045 (45н/120н) и GPDК090 (100н/120н), полученные в САПР Cadence IC 6.1. Характеристики для норм GPDК045 (45н/360н) и GPDК090 (100н/360н) получены аналогичным образом.

Сток-затворная характеристика МОП-транзистора с индуцированным каналом P-типа аппроксимируется функцией вида:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6 + a_7x^7 + a_8x^8 + a_9x^9 + a_{10}x^{10} \quad (11)$$

Аппроксимация проведена полиномом Чебышева с использованием метода наименьших квадратов. Он состоит в следующем: для заданных исходных точек $\{X_i; Y_i\}$, $i = 1..N$ требуется найти такую аппроксимирующую функцию $F(x)$ (с некоторым набором произвольных коэффициентов, значения которых надо будет определить, согласно исходным данным), чтобы сумма квадратов отклонений $F(X_i)$ и Y_i была минимальной среди функций $Y(x)$ с другими коэффициентами.

Следовательно, надо минимизировать такую сумму: $S = \sum((F(X_i) - Y_i)^2)$, $i = 1..N$. Если в качестве $F(X)$ использовать полином степени N_p : $F(x) = K_0 + X \cdot K_1 + \dots + X^{N_p} \cdot K_{N_p}$, то фактически надо определить набор коэффициентов: $\{K_i\}$, $i = 0..N_p$. (вот почему надо иметь хотя бы $(N_p + 1)$ экспериментальных точек). В классе p -го порядка объектом будет полином, т. е. функция одной переменной (например, x) вида $p(x) = a^n \cdot x^n + \dots + a^2 \cdot x^2 + a^1 \cdot x + a^0$. Очевидно, полином как функция целиком определяется указанием целого положительного числа n , которое задает наибольший показатель степени аргумента, коэффициент при котором не равен нулю (a^n не равно нулю), и вектора длиной $n + 1$ из его коэффициентов $c = [a^n \dots a^2 a^1 a^0]$.

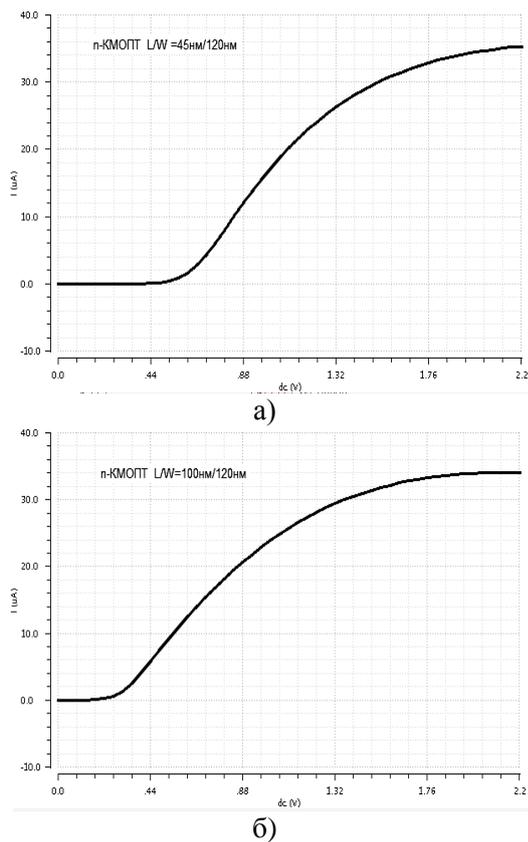


Рис. 2. Сток-затворные характеристики МОП-транзисторов: а – технологическая норма GPDК045 (45н/120н); б – технологическая норма GPDК090 (100н/120н)

В программной среде MathLab 12 была реализована программа, позволяющая при использовании полиномов Чебышева провести с заданной точностью аппроксимацию построенных в САПР Cadence IC 6.1 сток-затворных характеристик.

Полученные коэффициенты аппроксимирующей функции (11) для каждой технологии представлены в табл. 1.

На рис. 3 представлены аппроксимированные сток-затворные характеристики МОП-транзисторов.

Погрешность измерений при аппроксимации методом наименьших квадратов имеет порядок $10^{-9} - 10^{-8}$, что позволяет говорить о достаточной точности расчетов.

Для определения амплитудных значений составляющей промежуточной частоты и помеховой составляющей в программной среде MathLab 12 были реализованы две программы с использованием выражений (6) и (7) соответственно. Используя полученные результаты аппроксимаций сток-затворных характеристик программы позволяют с необходимым смещением рассчитывать искомые составляющие для различных амплитуд входного сигнала, гетеродина и помехи. Причем данные результаты могут быть рассчитаны для любых технологий с субмикронными и глубоко-субмикронными топологическими нормами. Благодаря разработанной программе можно рассчитать предельную эффективность МОП - структуры в режиме некротного преобразования частоты для технологий с субмикронными и глубоко-субмикронными топологическими нормами.

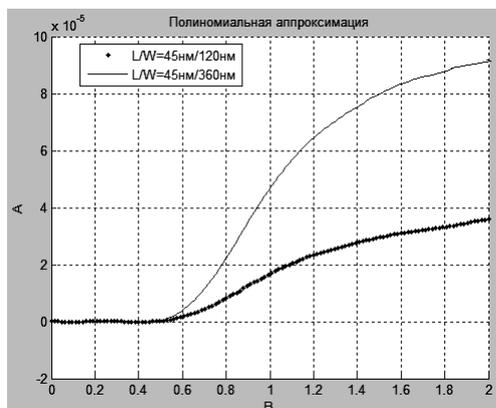
Алгоритм работы программы [2] для определения амплитудных значений составляющей промежуточной частоты представлен на рис. 4.

Коэффициенты аппроксимирующей функции

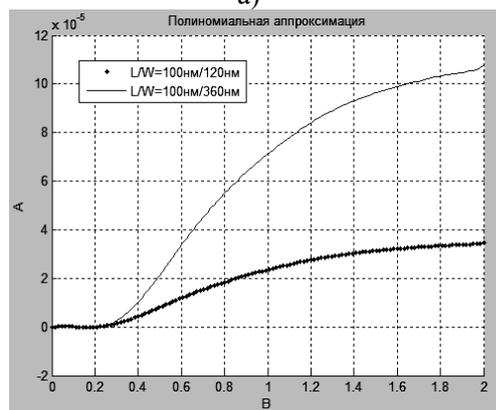
Таблица 1

a_i	Технология GPDК045 45нм/120нм	Технология GPDК045 45/360 нм	Технология GPDК090 100/120 нм	Технология GPDК090 100/360 нм
a_0	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0001
a_1	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0034
a_2	-0.0000	-0.0003	-0.0003	-0.0033
a_3	0.0006	0.0032	0.0016	0.2952
a_4	-0.0031	-0.0141	-0.0035	-1.4886
a_5	0.0075	0.0321	0.0041	3.3586
a_6	-0.0100	-0.0414	-0.0028	-4.2099
a_7	0.0077	0.0314	0.0010	3.1296
a_8	-0.0035	-0.0140	-0.0002	-1.3748
a_9	0.0008	0.0034	-0.0000	0.3302
a_{10}	-0.0001	-0.0003	0.0000	-0.0334

В блоке 1 производится ввод констант: X_1 , X_2 , X_3 – амплитуды гетеродина, сигнала и помехи; por – порядок вычисления производной (степень полинома Чебышева). В блоке 2 производится ввод коэффициентов полинома Чебышева $a_0 - a_{10}$ при аппроксимации сток-затворной характеристики степенным полиномом 10-й степени по методу наименьших квадратов.



а)



б)

Рис. 3. Аппроксимированные сток-затворные характеристики МОП-транзисторов: а – технологическая норма GPDK045 (45n/120n) и (45n/360n); б – технологическая норма GPDK090 (100n/120n) и (100n/360n)

Блок 3 представляет собой функцию вычисления факториала. В блоке 4 производится ввод максимального значения постоянной составляющей X_0 . Блок 5 осуществляет цикл с изменением постоянной составляющей X_0 от 0 до максимального значения введенного в блоке 4. Блок 6 задает смещение постоянной составляющей (в нашем случае смещение составляет 0.1). В блоке 7 осуществляется ввод заранее найденных выражений производных аппроксимирующей сток-затворной характеристики КМОП транзистора с каналом р-типа. В блоке 8 происходит обнуление переменных k_1 , k_2 и k_3 с помощью которых организованы нижеследующие циклы (блоки 9, 10, 11). Блок 9 осуществляет цикл с изменением переменной k_1 от 0 до зна-

чения равного порядку вычисления производной por . Блок 10 осуществляет цикл с изменением переменной k_2 от 0 до значения переменной k_1 . Блок 11 осуществляет цикл с изменением переменной k_3 от 0 до значения $k_1 - k_2$. Блок 12 представляет собой процедуру возведения в степень. В блоке 13 происходит основное вычисление выражения (6). Далее в блоке 14 полученное значение заносится в массив. В блоке 15 происходит суммирование полученных значений амплитуд выходного тока. После просчета суммированных значений амплитуд выходного тока для каждого значения постоянной составляющей происходит вывод значений X и Y (блок 16) на экран в виде графика.

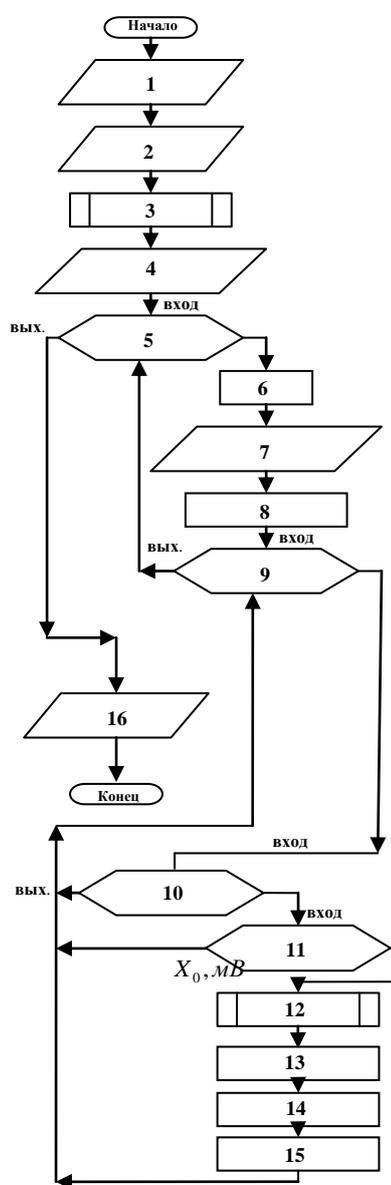


Рис. 4. Алгоритм работы программы для определения амплитудных значений составляющей промежуточной частоты

Частотные свойства МОП транзистора используемого в преобразователе частоты зависят от времени пролета носителей через канал и от времени перезарядки емкости, образующейся между затвором и объемом полупроводника, через сопротивление канала. Поскольку время пролета носителей тока через канал чрезвычайно мало по сравнению с постоянной времени цепи затвора, то влиянием этого фактора можно пренебречь. Поэтому предельная частота МОП транзистора

$$f_{\max} = 1/2\pi\tau \quad (12)$$

где $\tau = RC_3$ – постоянная времени заряда емкости затвора. (R – сопротивление канала; C_3 – емкость затвора)

Емкость затвора

$$C_3 = \varepsilon_d \varepsilon_0 l w / h_d \quad (13)$$

Крутизна в области насыщения

$$S_{\text{НАС}} = \frac{\varepsilon_d \varepsilon_0 \mu \omega}{h_d l} (U_3 - U_0) \quad (14)$$

Подставляя в выражение (12) величины $S_{\text{НАС}}$ и C_3 из выражений (13) и (14) и учитывая, что минимальное сопротивление полностью открытого канала $R = 1/S_{\text{НАС}}$, получаем

$$f_{\max} = \frac{\mu}{2\pi l^2} (U_3 - U_0) \quad (15)$$

Например, для МОП транзистора с индуцированным каналом n-типа для технологии 0,18 мкм: $l = 0.18$ мкм; $\mu = 307 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$; $U_3 = 0,45 \text{ В}$; $U_0 = 1,8 \text{ В}$. Подставляя значения в формулу (15) найдем максимальную частоту на которой можно использовать транзистор

$$f_{\max} = \frac{307 \cdot 1.35}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.0324 \cdot 10^{-8}} = 203.6 \text{ ГГц}$$

В реальных МОП структурах предельная частота значительно ниже. Это связано с тем, что на частотный предел МОП транзисторов оказывают влияние паразитные емкости, к числу которых относятся емкости переходов подложка – исток, подложка – сток, а также паразитная емкость затвора, обусловленная перекрытием металлизации затвора диффузионных областей стока и истока. Предельная частота транзистора

f_{\max} зависит также от подвижности основных носителей в канале. Подвижность электронов в кремнии $\mu_n = 350 - 400 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ вдвое превышает подвижность дырок $\mu_p = 150 - 200 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Поэтому преобразователи частоты на МОП транзисторах с каналами n-типа являются более быстродействующими по сравнению с аналогичными схемами на транзисторах с каналом p-типа.

У транзисторных преобразователей частоты зависимость крутизны преобразования от амплитуды подводимого напряжения гетеродина сохраняется близкой к линейной лишь при амплитуде напряжения, подводимого от гетеродина, не более 80 – 120 мВ. Для уменьшения нелинейных искажений подводимое от гетеродина напряжение обычно имеет амплитуду около 200 мВ [3].

Для каждой из технологических проектных норм GPDК045 (45н/120н) и (45н/360н), GPDК090 (100н/120н) и (100н/360н) были проведены расчеты со значениями полезного сигнала, сигнала гетеродина и помехи, представленными в табл. 2.

Уровни сигналов Таблица 2

№ измерения	1 (Y9)	2 (Y10)	3 (Y11)	4 (Y12)
Напряжение гетеродина, мВ	200	200	200	200
Напряжение сигнала, мкВ	10	10	10	10
Напряжение помехи, мВ	150	100	50	20

Полученные зависимости отношений амплитуд выходного тока промежуточной частоты к амплитудам тока помеховой составляющей на выходе преобразователя от величины постоянной составляющей входного напряжения показаны на рис. 5 (для длин каналов 45 нм и 100 нм и ширины 120 нм).

Заключение.

Используя Cadence IC 6.2 получены сток-затворные характеристики транзисторов и проведена их аппроксимация в программной среде MathLab 12.

Разработаны алгоритмы автоматизированного вычисления синфазных компонент «информационной и помеховой» спектральных составляющих промежуточной частоты.

В микро- и наноразмерных технологиях выявлено влияние режима работы МОП-транзистора на преобразовательный процесс в интенсивной помеховой обстановке.

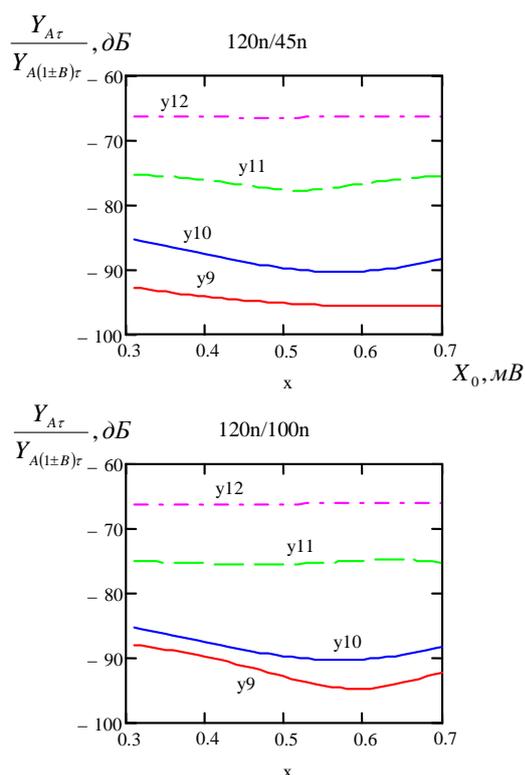


Рис. 5. Зависимости отношений амплитуд выходного тока промежуточной частоты к амплитудам тока помеховой составляющей на выходе преобразователя от величины постоянной составляющей входного напряжения

Установлено:

При повышении на входе системы уровня помехи на 130 мВ отношение сигнал/помеха на выходе системы снижается на 29 дБ при неизменных значениях напряжений сигнала и гетеродина, что является приемлемым при проектировании преобразователя частоты на транзисторах с индуцированным каналом n-типа и длиной канала 45 и 100 нм.

Повышение уровня постоянной составляющей входного сигнала до 0,6 мВ приводит к увеличению отношения сигнал/помеха на выходе системы до 6 дБ.

Воронежский государственный технический университет

STUDY OF THE FREQUENCY CONVERTER IS MADE IN THE SUB-MICRON TECHNOLOGICAL BASIS

D.V. Zhuravlev, A.I. Mushta

Calculated Raman components of the intermediate frequency and interference component at the frequency inverter output if its input intensive harmonic interference. Obtained and approximated the drain-gate characteristics for MOS transistors, made in the technological bases GPDK045, GPDK090. The algorithm and method of calculating the in-phase component of the spectral components of the intermediate frequency and the noise component at the output of the frequency Converter if the input is intense interference. The analysis of nonlinear processes in the frequency Converter and the evaluation of the efficiency of conversion with different signal levels at the input of the Converter, in different technological bases, with different channel parameters

Key words: MOSFET, technological basis, the frequency conversion

Снижение напряжения помехи ниже 100 мВ, что соответствует отношению сигнал/помеха на выходе преобразователя частоты порядка 80-90 дБ, приводит к спадающему характеру изменения выходного тока. Причем при увеличении длины канала ток стока уменьшается.

При увеличении помехи от 60 дБ до 90 дБ за счёт роста уровня «помеховой части» тока преобразованной компоненты промежуточной частоты ток стока транзисторов увеличивается примерно на 6 % при использовании канала $W=120$ нм $L=100$ нм, и примерно на 10 % при использовании каналов $W=360$ нм $L=45-100$ нм.

При фиксированных значениях воздействующих на затвор напряжений присутствие помехи порождает наименьший вклад в преобразованную компоненту полезного сигнала в смесителе на транзисторе с каналом $W=120$ нм $L=100$ нм.

Для достижения максимальной эффективности преобразования целесообразно использовать транзисторы с длиной канала 90-120 нм и шириной 120-50 нм при напряжении смещения на входе 0,57 В.

Литература

1. Пожидаев, Л.И. Оценка эффективности транзисторного преобразователя частоты при воздействии на его вход интенсивной гармонической помехи [Текст] / Л.И. Пожидаев, А.И. Мушта // Радиотехника и электроника. – 1983. – С. 2067-2068.
2. Журавлёв, Д.В. Алгоритм расчета спектральной компоненты преобразованной частоты с МДП-транзистором, реализованным по глубоко субмикронной или нанотехнологии [Текст] / Д.В. Журавлёв, А.И. Мушта // Информац. бюллетень "Алгоритмы и программы" – Москва : ФГАНУ "Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти" – 2013. – Вып. № 2. – С. 42
3. Sheng, S. Li. Semiconductor Physical Electronics (Second Edition) [Текст] : [Электронный ресурс] / S. Li. Sheng – Springer, 2006. – электрон. опт. диск.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МНОГОСИГНАЛЬНОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Н.А. Самоцвет

Приводится обоснование метода измерения многосигнальной избирательности приемника прямого преобразования. Приведена структурная схема измерительной установки и даны примеры практической реализации процедур измерения, учитывающие специфику измерения многосигнальной избирательности приемника прямого преобразования

Ключевые слова: многосигнальная избирательность, приемник прямого преобразования, показатель, эффективность, помеха

Введение

Испытания РЭС на РЭЗ включают измерения многосигнальной избирательности радиоприемных устройств. Для супергетеродинных приемников методики измерения многосигнальной избирательности разрабатывались в течение нескольких десятилетий и завершили стандартизацией как характеристик избирательности, так и методов их измерений (ГОСТ 12252-86, ГОСТ 22580-84), а также стандартизацией норм на значения характеристик многосигнальной избирательности (ГОСТ 5651-82, Нормы ГКРЧ и др.). Известен также патент РФ № 2287900 на способ измерения многосигнальной избирательности приемника широкополосных сигналов.

Однако до настоящего времени для приемников прямого преобразования (ПРМ ПП) нет ни полного общепризнанного перечня измеряемых характеристик, ни установившихся способов измерений, ни действующих межведомственных норм на параметры их многосигнальной избирательности.

В последние годы ПРМ ПП находят все более широкое применение в современных коммуникационных технологиях мобильной связи (например, в оборудовании для «последней мили»). Так, например, широко развита цифровая технология радиодоступа в телефонные сети общего пользования на основе стандарта DECT. В состав аппаратуры связи этого стандарта, выпускаемой многими известными зарубежными и отечественными производителями оборудования, в качестве важнейших элементов входят ПРМ ПП. Массовое использование указанного оборудования официально разрешено с 1998 г. решением ГКРЧ и приказом Госкомсвязи России. В последнее время стремительно развиваются технологии WiMax, WiFi и другие, которые также широко используют цифровые приемники прямого преобразования.

В связи с тенденцией усложнения проблемы электромагнитной совместимости радиосредств отсутствие данных о многосигнальной избирательности ПРМ ПП приводит к экстремальным ситуациям в сложной электромагнитной обстановке. Как следствие, прогноз поведения приемников, особенно в

экстремально тяжелой электромагнитной обстановке, ненадежен

Исходя из этого, целью статьи является обоснование метода измерения многосигнальной избирательности радиоприемных устройств, построенных по принципу прямого преобразования частоты.

1. Описание сущности существующего способа измерения частотной избирательности приемников

Способ измерения избирательности однополосных радиоприемников сухопутной подвижной службы изложен в ГОСТ 22579-86 (описание этого стандарта в части измерения характеристик частотной избирательности супергетеродинного приемника многосигнальным методом приведено также в книге Бадалова А.Л. и Михайлова А.С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990, на стр. 201 – 208, рис. 8.20) многосигнальную интермодуляционную избирательность супергетеродинного приемника методом измерения А02 определяют в следующей последовательности:

на вход приемника на частоте настройки поддают нормальный испытательный сигнал от генератора сигналов 1 и устанавливают уровень полезного сигнала U_c , при котором отношение сигнал/шум равно 12 дБ;

устанавливают частоту генератора сигналов 1, равной $f_{r1} = f_{ном} + 6850$ Гц, и частоту генератора 2 равной $f_{r2} = f_{ном} + 12700$ Гц,

увеличивают уровни мешающих сигналов, до значения, при котором проявляется интермодуляция;

частоту второго генератора помех подстраивают так, чтобы интермодуляция проявилась в наибольшей степени;

увеличивают уровни мешающих сигналов до значения U_p , при котором отношение сигнал/шум на выходе приемника становится равным 12 дБ;

измерения повторяют при установке частоты генератора 1, равной $f_{r1} = f_{ном} - 7300$ Гц, многосигнальную интермодуляционную избирательность приемника определяют по формуле $S_{и} = 20 \lg U_p / U_c$.

Недостатком способа является то, что измерение многосигнальной избирательности проводится

для приемников, построенных по супергетеродинной схеме, а для оценки избирательности приемников прямого преобразования этот способ в большинстве случаев непригоден. Он не учитывает особенностей принципов построения ПРМПП.

2. Обоснование метода измерения частотной избирательности приемника прямого преобразования

Для устранения указанного недостатка в способе измерения многосигнальной избирательности ПРМПП с помощью генератора СВЧ формируют входной трехчастотный испытательный сигнал (генератор СВЧ имеет вход для внешней амплитудной модуляции). Генератор обеспечивает подачу на вход приемника смеси из сигнала на частоте настройки генератора f и сигналов двух боковых симметричных составляющих с несущими частотными составляющими на частотах $f + F$ и $f - F$. Измерения проводят в два этапа:

на первом этапе формируют комбинационные и интермодуляционные искажения в приемнике, причем частоту генератора СВЧ настраивают на среднюю частоту соседнего канала ПРМПП, а частоты низкочастотных составляющих выбирают так, чтобы они отстояли на оси частот от модулируемого высокочастотного колебания генератора СВЧ (настроенного на частоту соседнего канала ПРМПП) на симметричные расстояния по частотной оси, численно равные частотному разнесу между каналами приемника (совмещают среднюю частоту спектра трехчастотного амплитудно-модулированного испытательного сигнала со средней частотой соседнего канала при фиксированной настройке приемника);

на втором этапе формируют только комбинационные искажения в приемнике, подавая на его вход только сигнал на частоте f .

Для пояснения сущности способа необходимо перечислить наиболее опасные механизмы возникновения помех по побочным каналам приема в приемнике прямого преобразования при многосигнальном воздействии. Они заключаются в следующем:

Прохождение помех из-за неидеальной линейной избирательности ПРМПП (недостаточный коэффициент прямоугольности полосы пропускания приемника и конечная величина ослабления фильтра НЧ при отстройках).

Нелинейное поражение из-за эффекта блокирования.

Нелинейное поражение из-за возникновения интермодуляционных искажений 3-го порядка вида $2f_1 - f_2$, $2f_2 - f_1$, $f_1 + f_2 - f_3$, попадающих в полосу настройки ПРМПП, где f_1, f_2, f_3 – частоты мешающих сигналов (помех) за пределами полосы настройки приемника.

Нелинейное поражение из-за возникновения комбинационных искажений вида $f_{\Pi} - f_{ГЕТ} = F$, $|f_{ГЕТ} - f_{\Pi}| = F$, $2f_{ГЕТ} - f_{\Pi} = f_C$, где $f_{ГЕТ}$ –

частота настройки гетеродина ПРМПП, f_C – частота настройки ПРМПП, f_{Π} – частота мешающего сигнала (помехи) за пределами полосы настройки приемника.

Необходимо отметить, что механизмы возникновения побочных каналов по пунктам 3 и 4 являются наиболее опасными именно для приемников прямого преобразования (это связано с особенностями их принципа построения), поэтому необходимо обосновать методику измерения многосигнальной избирательности по этим каналам для ПРМПП.

Принцип действия современного приемника прямого преобразования описан в книге Сергея Дингеса «Мобильная связь: технология DECT» / Изд-во СОЛОН-Пресс, 2003 (серия «Библиотека радиоинженера»), указанная информация об особенностях построения и специфических побочных каналах приема ПРМПП приводится также в ресурсах Интернет на информационном портале «Радио Дизайн» в разделе «Архитектура тракта приема РЧ блоков» (рисунки 6, 8 – 10 с пояснениями).

Принцип работы ПРМПП иллюстрируется схемой и эюрами, приведенными на рисунке 1.

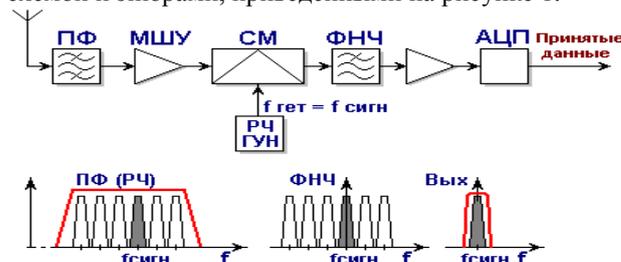


Рис. 1. Структура и принцип работы ПРМПП

В отличие от супергетеродина приемник прямого преобразования содержит только один смеситель, установленный либо непосредственно на входе приемника, либо после УВЧ (маломощного усилителя) с небольшим коэффициентом усиления. Гетеродин настраивается примерно на частоту сигнала, разница между частотами гетеродина и сигнала лежит в области низких (звуковых) частот и составляет, например, 0,5...1 кГц для аналоговых приемников речевых сигналов [1, 2]. На выходе смесителя выделяется сигнал этой звуковой частоты, подаваемый на фильтр нижних частот (ФНЧ), служащий для ослабления сигналов соседних по частоте станций, и далее на УНЧ с большим коэффициентом усиления и с хорошей частотной избирательностью.

В нашем примере при частоте настройки ПРМПП 7010 кГц частота гетеродина должна составлять либо 7009 (нижняя настройка гетеродина), либо 7011 кГц (верхняя настройка гетеродина). И в том и в другом случае преобразованная звуковая частота составит 1 кГц, только полезный и зеркальный каналы (они же соседние каналы для ПРМПП) поменяются местами. При этом фильтр маломощного усилителя (УВЧ или преселектора в виде полосового фильтра) в ПРМПП не может значительно ослабить зеркальный канал (как это делают в супергетеродинном приемнике). Основная избирательность в

ПРМ ПП обеспечивается фильтром УНЧ, поскольку в таком приемнике тракт промежуточной частоты отсутствует. Еще одна особенность ПРМ ПП – сигнал гетеродина постоянно создает помеху по соседнему каналу, что приводит к эффекту блокирования полезного сигнала. Избавляются от этой помехи улучшением АЧХ фильтра УНЧ. Однако исследование этого эффекта (как односигнального) выходит за рамки статьи и поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Комбинационные искажения (свисты) в ПРМ ПП возникают из комбинационных частот, близких как к гетеродину, так и к сигналу. Например, при частоте настройки гетеродина 7011 кГц (верхняя настройка) и наличии сигнала помехи достаточной мощности на входе приемника на частоте 7012 кГц в полосу пропускания УНЧ попадет комбинационный сигнал на частоте $7012 - 7011 = 1$ кГц, который будет принят как полезный сигнал. При этом побочный комбинационный канал приема на частоте 7012 кГц одновременно будет являться (только в ПРМ ПП!) аналогом зеркального канала в супергетеродинном приемнике. Он отстоит на оси частот от частоты настройки ПРМ ПП (7010 кГц) на удвоенную величину разноса между каналами (2 кГц).

Интерференционные искажения и соответствующие им побочные каналы приема ПРМ ПП возникают при многосигнальном воздействии из-за биений частот двух (и более) мешающих сигналов помех на входе приемника, частоты которых не совпадают с частотами основного и побочного каналов приемника [по ГОСТ 23611-79]. Для нашего примера (ПРМ настроен на частоту 7010 кГц при верхней настройке гетеродина) одним из возможных вариантов интермодуляционного поражения ПРМ ПП является продукт нелинейного преобразования третьего порядка на любых нелинейных элементах (не обязательно в смесителе) приемника на частоте $f_{\text{инт}} = 2f_2 - f_1 = 2 \cdot 7011 - 7012 = 7010$ кГц, где частоты f_1 и f_2 соответствуют помехам из эфира.

Если частота f_2 отсутствует в эфире (на вход приемника воздействует только помеха на частоте 7012 кГц), то в данном случае на частоте 7011 кГц подается сигнал от гетеродина в смеситель и в нем также возникает нежелательная комбинационная помеха на частоте 7010 кГц (такая помеха в принципе может образоваться не только в смесителе, но в нем созданы наиболее «благоприятные» условия для нелинейной комбинации сигналов, поскольку сигнал гетеродина имеет большую амплитуду и принимаемый сигнал помехи на частоте 7012 кГц усилен в УВЧ).

2. Методика измерений

Последний пример позволяет обосновать новую простую практически ценную методику для раздельного оценивания комбинационных и интер-

модуляционных искажений в приемнике по механизмам п.п. 3 и 4. Сущность ее заключается в том, что для выявления комбинационных и интермодуляционных искажений в ПРМ ПП на его вход подают таким образом специально сформированный трехсигнальный испытательный сигнал, который позволит создать в приемнике одновременно как комбинационные, так и интермодуляционные искажения, а затем, подавая испытательный сигнал только на одной частоте (например, f_2), можно выявить искажения только комбинационного типа. Сравнение двух указанных эффектов путем раздельного определения относительных уровней комбинационных и интермодуляционных каналов приема позволит определить вклад как интермодуляционных, так и комбинационных искажений в помехозащищенность ПРМ ПП. При этом сложная процедура определения этих каналов упрощается.

Интерференционные искажения являются наиболее опасными в ПРМ ПП, поскольку их частоты находятся либо в полосе основного приема, либо незначительно удалены от нее по оси частот, то есть находятся в области соседних каналов. Анализ особенностей принципов построения ПРМ ПП и опыт их эксплуатации показывает, что механизмы 3 и 4 являются наиболее опасными с точки зрения поражения приемника многосигнальными помехами.

Таким образом, для полной оценки характеристик избирательности ПРМ ПП необходимо измерять характеристики, соответствующие механизмам воздействия по п. п. 3, 4, причем отдельно друг от друга и от механизмов воздействия по другим пунктам. Для оценки параметров многосигнальной избирательности ПРМ ПП по рассматриваемым в рамках данной статьи механизмам 3 и 4 необходимо сформировать различное распределение частот помех. Покажем, что это распределение возможно реализовать с помощью операций формирования трехчастотного испытательного сигнала, учитывающего особенности принципов построения ПРМ ПП.

Формирование помех производится в два этапа. На первом этапе создают многосигнальную помеху, приводящую к возникновению как интермодуляционных, так и комбинационных помех в ПРМ ПП. Этот этап измерений иллюстрируется рисунком 2, на котором использованы следующие обозначения:

$f_C, f_{ГЕТ}$ – соответственно, частота настройки приемника и частота гетеродина ПРМ ПП,

f – частота настройки генератора сигналов СВЧ для создания помехи на входе ПРМ ПП с амплитудой $U_{П}$,

F – низкая частота, подаваемая на генератор сигналов СВЧ через вход внешней амплитудной модуляции от генератора НЧ.

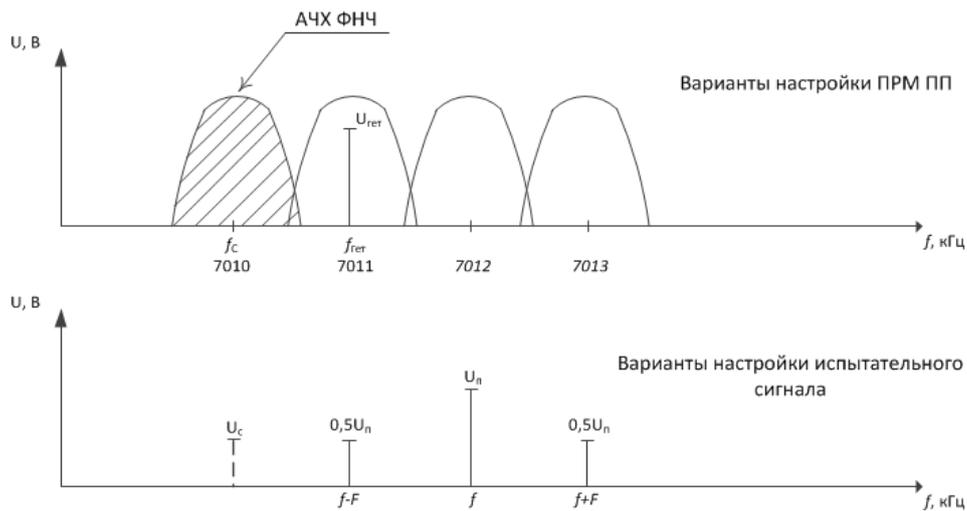


Рис.2. Пример формирования помех

Анализ механизмов возникновения комбинационных и интермодуляционных искажений применительно к рассматриваемому примеру показывает: на выходе приемника (при отсутствии сигнала на входе ПРМ ПП) возникают наиболее опасные помехи интермодуляционного типа на частоте настройки приемника (7010 кГц) при следующих комбинациях частот:

$2(f - F) - f$; - эта «классическая» интермодуляционная помеха проникает на выход приемника через вход ПРМ ПП, настроенного на частоту 7010 кГц;

$f - (f - F)$ - эта интермодуляционная помеха имеет частоту 1 кГц и поэтому проникает на выход приемника через фильтр НЧ с выхода смесителя;

$f + (f - F) - (f + F)$ - возникает за счет явления интермодуляции 3-го порядка при взаимодействии помех на трех частотах и проникает через вход приемника;

$2f - (f + F)$; (эта помеха воздействует по соседнему каналу).

Все указанные искажения являются продуктами интермодуляции 3-го порядка, не ослабляются в УВЧ или преселекторе ПРМ ПП и поэтому приводят к поражению приемника. При настройке средней частоты испытательного сигнала f на частоту 7009 кГц при той же частоте настройки приемника, также возникнут интермодуляционные искажения, частоты которых попадут в приемник либо через вход смесителя, либо через его выход. Вместе с указанными интермодуляционными помехами в ПРМ ПП возникают и комбинационные помехи, например, на частотах $f - f_{ГЕТ}$, $2f_{ГЕТ} - f$ и других. Из анализа рисунка 2 следует, что при отключении внешней амплитудной модуляции от генератора СВЧ (на вход ПРМ ПП подается только сигнал на частоте f) соответствующие побочные комбинационные каналы могут быть измерены по известной методике.

На втором этапе измерений на вход приемника подают сигнал только на частоте генератора СВЧ f

и измеряют относительный уровень комбинационных каналов на частотах $f - f_{ГЕТ}$; $2f_{ГЕТ} - f$. Таким образом, зная вклад этих каналов в общую помехозащищенность приемника, можно отдельно оценить опасность как интермодуляционных, так и комбинационных каналов ПРМ ПП.

Приведенные на рисунке 2 амплитуды испытательного сигнала соответствуют идеальному случаю амплитудной модуляции несущей гармоническим (тональным) сигналом.

Структурная схема измерительной установки для реализации предлагаемого метода оценки многосигнальной избирательности ПРМ ПП приведена на рисунке 3.

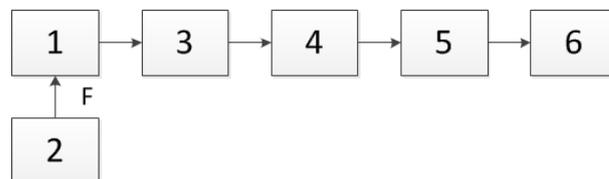


Рис. 3. Структурная схема измерительной установки

На рисунке введены следующие обозначения:

- 1 – генератор сигналов СВЧ;
- 2 – низкочастотный генератор;
- 3 – согласующее устройство;
- 4 – эквивалент антенны приемника;
- 5 – приемник;
- 6 – измеритель отношения сигнал-шум.

Измерение многосигнальной избирательности приемника прямого преобразования сводится к следующему:

1. На вход приемника на частоте настройки подают нормальный испытательный сигнал от генератора СВЧ 1 мощностью P_c и устанавливают отношение сигнал-шум на выходе приемника равным 12 дБ;

2. Включают генераторы помех на частотах, соответствующих сначала первому виду распределения (рисунок 2, генератор 2 включен, этап 1 – формирование комбинационных и интермодуляционных искажений), затем – второму виду распреде-

ления (генератор 2 выключен, этап 2 – формирование только комбинационных искажений);

3. Повышают амплитуду помех U_p до проявления интермодуляционных и (или) комбинационных помех при первом и втором вариантах подачи помех;

4. Многосигнальную избирательность приемника определяют по формуле.

$$S_u = 20 \lg \frac{U_n}{U_c},$$

При испытаниях цифровых приемников в соответствии с предлагаемой технологией опасность воздействия интермодуляционной помехи оценивают по показателю BER (относительное количество ошибочно принятых двоичных символов), при этом на вход приемника подают тестовый испытательный цифровой сигнал.

Выводы

Предлагаемый метод измерений обеспечивает количественную оценку относительных уровней побочных каналов ПРМ ПП при многосигнальном мешающем воздействии и позволяет упростить состав аппаратного обеспечения измерений по сравнению со способом-прототипом за счет уменьшения количества применяемых дорогостоящих генераторов СВЧ.

При испытаниях цифровых приемников опасность воздействия интермодуляционной помехи оценивают по показателю BER (относительное количество ошибочно принятых двоичных символов), при этом на вход приемника подают стандартный тестовый испытательный цифровой сигнал.

Литература

1. Бененсон, Л.Д. Рассеяние электромагнитных волн антеннами [Текст] / Л.Д. Бененсон, Я.Н. Фельд // Радиотехника и электроника. - 1988. - Т. 33. - №2. - С. 225 – 245.
2. Воскресенский, Д.И. Эффективная поверхность рассеяния остронаправленных антенн и антенных решеток [Текст] / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев, А.В. Шаталов / Вопросы снижения эффективной поверхности рассеяния, под ред. П.Я. Уфимцева. - М.: ИРЭ РАН. - 1989. - С. 117 – 125.
3. Панычев, С.Н. Влияние характеристик рассеяния антенн на точность измерения параметров излучающих систем в ближней зоне [Текст] / С.Н. Панычев, Э.А. Соломин // Измерительная техника. - 1995. - №5. - С. 56 – 58.
4. Гладышев, А.К. Влияние характеристик рассеяния антенны на показатели качества функционирования РЭС [Текст] / А.К. Гладышев, Е.Ф. Иванкин, С.Н. Панычев // Измерительная техника. - 1995. - №2. - С. 48 – 50.
5. Еремин, В.Б. Характеристики рассеяния антенн и фазированных антенных решеток. [Текст] / В.Б. Еремин, С.Н. Панычев // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1997. - №8. - С. 61 – 70.
6. Панычев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния антенны на энергетические параметры спутниковых систем связи. [Текст] / С.Н. Панычев // Известия вузов. Радиоэлектроника. - 2001. - №3–4. - С. 74 – 79.
7. Панычев, С.Н. Косвенный метод определения структурной составляющей рассеяния антенны. [Текст] / С.Н. Панычев, Э.А. Соломин // В сб.: Радиопромышленность. - М.: НИИЭИР. - 1993. - С. 60 – 62.

8. Панычев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния измерительных антенн на точность измерения плотности потока энергии электромагнитного поля. [Текст] / С.Н. Панычев, П.М. Мусабеков // Метрология. - 1998. - Т.6. - С. 36 – 41.

9. Панычев, С.Н. Методика расчета энергетических потерь в радиоприемниках, обусловленных рассеянием радиоволн на антеннах СВЧ. [Текст] / С.Н. Панычев // Антенны. - №. 5(51). - 2001. - С. 68 – 70.

10. Гладышев, А.К. Экспериментально-расчетная модель оценки характеристик рассеяния апертурных антенн. [Текст] / А.К. Гладышев, С.Н. Панычев, Е.Ф. Иванкин // Метрология. - 1993. - №11. - С. 24 – 28.

11. Гладышев, А.К. Оценка возможности применения измерительных антенн в качестве рабочих мер ЭПР. [Текст] / А.К. Гладышев, С.Н. Панычев, Е.Ф. Иванкин // Измерительная техника. - 1993. - №2. - С. 57 – 59.

12. Ибрагимов, Н.Г., Панычев С.Н., Савинов В.А. Методика и результаты эксперимента по исследованию характеристик отражения рупорной антенны в широком диапазоне частот. [Текст] / Н.Г. Ибрагимов, С.Н. Панычев, В.А. Савинов. - В кн.: Антенные измерения. ВНИИРИ. Ереван. - 1990. - С. 191 – 192.

12. Кузнецов, А.А. Характеристики рассеяния линейных вибраторных решеток Ван-Атта. [Текст] / А.А. Кузнецов // Журнал радиоэлектроники. - 2014. - №5. - С. 37 – 43.

13. Формализованный подход к генерации рациональных вариантов развития системы испытаний техники радиоэлектронной борьбы. [Текст] / С.Н. Панычев, Д.М. Бывших, С.В. Суворцев, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 3-1. - С. 71-75.

14. Волков, А. В. Синтез схемы дальномаршепеленгатора на основе процедур пересечения и объединения с обработкой сигнала во временной области [Текст] / А.В. Волков, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 4. - С. 12-14

15. Оптимальный прием и обработка радиосигналов в нелинейном канале ВЧ-облучения для дистанционного снятия акустической информации [Текст] / В.Б. Авдеев, С.Н. Панычев, Н.Г. Денисенко, Н.А. Самоцвет, М.С. Сквипин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 94-98

16. Расчетно-инструментальный метод анализа прохождения случайного процесса через нелинейную цепь [Текст] / С.Н. Панычев, М.Ф. Пашук, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.Е. Ломовских // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 109-113.

17. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств [Текст] / В.М. Питолин, С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, С.А. Акулинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - №.6-3 С. 45-48.

18. Питолин, В.М. Анализ методов формирования сигналов и помех с заданными законами распределения параметров [Текст] / В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.В. Волков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9. - №.5-1. - С. 34-36.

19. Панычев, С.Н. Алгоритм формирования имитационных помех с заданными спектральными и информационными свойствами [Текст] / С.Н. Панычев, С.В. Суворцев, С.В. Канавин // Труды XIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC- 2013. - Воронеж. - Т.3. - С. 2012-2017.

20. Суровцев, С.В. Когнитивный алгоритм корреляционно-фильтровой обработки сложных сигналов на фоне гауссовых шумов [Текст] / С.Н. Панычев, С.В. Суровцев, Н.А. Самоцвет // Труды XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC- 2014. - Воронеж. - Т.4. - С. 2000-2008.
21. Самоцвет, Н.А. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств. [Текст] / С.Н. Панычев, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, С.В. Суровцев // Материалы ежегодной Всероссийской конференции «Интеллектуальные информационные системы». - Воронеж: ВГТУ кафедра «Системы автоматизированного проектирования и информационные системы». - 2014. - С. 4-8
22. Самоцвет, Н.А. Методы формирования и обработки радиопомех с учетом их статистических свойств на основе технологий векторной генерации и анализа радиосигналов [Текст] / С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, Е.А. Сытник // Материалы IV НТК молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО». - М.: ГСКБ «Алмаз-Антей». - 2013. - С. 300-306.
23. Авдеев, В.Б. Особенности современных методов моделирования приема и обработки случайных радиосигналов на фоне шумов и помех. [Текст] / Авдеев В.Б., С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет // Доклад на конференцию 04.10.2013 Воронежский институт ФСИН. Воронежского института ФСИН России. - 2013. - №4. - С. 90-97.
24. Самоцвет, Н.А. Моделирование приёма и обработки случайных радиосигналов и помех [Текст] / С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, М.С. Сквopin // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве». - Воронеж: ВГТУ. - 2013. - С. 18-19.
25. Герасименко, В.Г. Методы защиты акустической речевой информации от утечки по техническим каналам. [Текст] / В.Г. Герасименко, Ю.Н. Лаврухин, В.И. Тупота // Инженерный журнал «Наука и инновации» Выпуск №11(23). - Москва: РЦИБ «Факел». - 2013. - С. 258-262.
26. Железняк, В.К. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации. [Текст] / В.К. Железняк, Ю.К. Макаров, А.А. Хорев // Спецтехника. - 2000. - № 4. С. 39-45.
27. Владимиров, В.И. Избранные вопросы радиоэлектронного подавления цифровых сигналов систем радиосвязи. [Текст] / В.И. Владимиров, И.В. Владимиров, В.В. Наметкин // Оценка удельной пропускной способности цифрового канала передачи информации при наличии помех. - Воронеж: ВАИУ. - 2010. - С. 34-44.
28. Подлесный, С.А. Устройства приема и обработки сигналов. Версия 1.0 [Текст] : учебное пособие [Электронный ресурс] / С.А. Подлесный, Ф.В. Зандер. – Красноярск: ИПК СФУ. – 2008. – С. 126. – Электрон. дан. (4 Мб).
29. Поляков, В.Т. Трансиверы прямого преобразования. [Текст] / В.Т. Поляков. – М.: ДОСААФ, 1984. –144 с.

Воронежский государственный технический университет

MEASUREMENT METHOD OF THE DIRECT TRANSFORMATION RECEIVER'S MULTI-ALARM SELECTIVITY

N.A. Samotcvet

Justification of a measurement method of the direct transformation receiver's multialarm selectivity is given. The block diagram of measuring installation is provided and the examples of practical realization of procedures of measurement considering specifics of measurement of multialarm selectivity of the receiver of direct transformation are given

Key words: multialarm selectivity, receiver of direct transformation, indicator, efficiency, hindrance

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ДИСКЕ, РАСПОЛОЖЕННОМ В ДВУМЕРНО-НЕОДНОРОДНОМ ПОГЛОЩАЮЩЕМ ПЛАЗМЕННОМ ОБРАЗОВАНИИ

А.Н. Косенков, А.П. Ярыгин

Представлены результаты исследования влияния поглощающих свойств плазменного образования с радиальной и угловой неоднородностью на дифракцию электромагнитных волн на идеально проводящем диске. Показано, что применение поглощающих плазменных образований позволяет исказить диаграмму обратного рассеяния и снизить амплитуду отраженных электромагнитных волн от объекта, помещенного в данное образование

Ключевые слова: плазменное образование, эйконал, цилиндр

Одним из перспективных направлений в снижении радиолокационной заметности является создание перспективных средств на основе использования искусственных плазменных образований. Одним из свойств плазменных образований является поглощение электромагнитных волн. До настоящего времени основное внимание уделялось исследованию рефракционных свойств «бесстолкновительной» непоглощающей плазмы [1, 2]. В настоящей работе рассматривается влияние поглощающих свойств двумерно неоднородного плазменного образования (струи) на характер рассеяния электромагнитных волн на объекте, прикрываемом таким образованием. В качестве объекта рассматривается идеально проводящий диск.

Рассмотрим поглощающее плазменное образование с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' , \quad (1)$$

где

$$\varepsilon' = 1 - \frac{N(r)}{N_{кр}} = 1 - \frac{\Phi^2}{r^2} , \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{N(r)}{N_{кр}} \left(\frac{v_{эфф}}{\omega} \right) , \quad (3)$$

$N_{кр} = \frac{m(\omega^2 + v_{эфф}^2)}{e}$ - критическая концентрация

электронов,

ω - циклическая частота,

$v_{эфф}$ - эффективная частота столкновений электронов,

m - масса электрона,

e - заряд электрона,

N - концентрация электронов,

$\Phi = \cos 2\theta$ - функция распределения концентрации электронов.

Будем полагать, что направление облучения остается неизменным и совпадает с осью вращения плазменного образования. Центр диска смещен относительно начала координат вдоль оси z_1 на расстояние z_0 при этом он находится в области плазменного образования с докритической концентрацией электронов. Рассматривается радиолокационный случай. Внешний радиус области плазменного образования обозначим a , радиус диска – d . На рисунке 1 показана схема облучения диска в плазменном образовании.

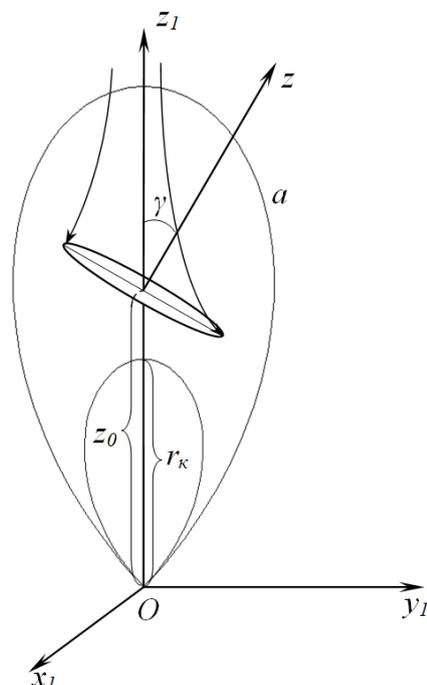


Рис. 1. Схема облучения диска в плазменном образовании

Косенков Андрей Николаевич – ВУНЦ ВВС «ВВА»,
адъютант, тел. 8(915) 541-30-60

Ярыгин Анатолий Петрович – ВУНЦ ВВС «ВВА», д-р
техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 244-78-14

Необходимо найти падающее поле в радиально неоднородном поглощающем плазменном образовании. Для этого воспользуемся методом геометрической оптики, который достаточно апробирован для случая плавно неоднородных сред, в том числе для сред с поглощением.

Рассматривая далее случай слабого поглощения, можем представить облучающее поле в виде

$$A = \left(A_0 e^{-\frac{k_0}{2} \int_r^a \varepsilon'' ds} \right) e^{ik_0 L}, \quad (4)$$

где $ds = \frac{\sqrt{m^2 + r^2 - 2\Phi^2}}{\sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr$ элемент длины дуги луча, A и L амплитуда и эйконал падающей волны, m – параметр разделения переменных определяется из уравнения траектории луча (10).

Решение уравнения переноса [3]

$$2(\nabla \dot{A}_0 \nabla \psi) + \dot{A}_0 \Delta \psi = 0 \quad (5)$$

для амплитуды A_0 можно записать в виде

$$A_0 = \sqrt{\frac{1}{Dr \cdot \sin \theta} \sqrt{\frac{m^2 - \Phi^2}{r^2 - m^2}}}, \quad (6)$$

где

$$D = \frac{m^2 - \Phi^2}{m^2} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 - m^2}} + \int_0^\theta \frac{\Phi^2}{[m^2 - \Phi^2]^{3/2}} d\theta \right]. \quad (7)$$

В результате решения дифференциального уравнения эйконала методом разделения переменных

$$\left(\frac{\partial L}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)^2 = \varepsilon', \quad (8)$$

эйконал принимает следующий вид

$$L = \int_0^\theta \sqrt{m^2 - \Phi^2} d\theta - m \cdot \arcsin\left(\frac{m}{r}\right) - \sqrt{r^2 - m^2}. \quad (9)$$

Уравнение траектории луча, проходящего через рассматриваемую точку внутри плазменного образования, определяется как

$$\int_0^\theta \frac{m}{\sqrt{m^2 - \Phi^2}} d\theta = \arcsin \frac{m}{r}. \quad (10)$$

Для дальнейших вычислений удобнее перейти к цилиндрической системе координат

(ρ, φ, z) , начало которой совпадает с центром диска. В результате имеем, что на поверхности диска выполняются соотношения

$$r \sin \theta = \sqrt{\rho^2 \cos^2 \varphi + \rho^2 \sin^2 \varphi \cos^2 \gamma}, \quad (11)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{z_0 - \rho \sin \varphi \sin \gamma}{r}\right), \quad (12)$$

$$r = \sqrt{\rho^2 + z_0^2 - 2z_0 \rho \sin \varphi \sin \gamma}. \quad (13)$$

Общее поле рассеяния диска в направлении на источник облучения может быть представлено в виде [2]

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{дв}} + \vec{E}_{\text{эд}}, \quad (14)$$

$$\vec{E}_{\text{дв}} = \frac{\vec{e}_\theta e^{ik_0 R}}{2R} \sum_{q=1}^n \frac{\sqrt{\varepsilon(\theta_q)}}{\sqrt{D_q} \left\{ 1 - D_q z_0 \cos \gamma \frac{\partial}{\partial \rho_q} \left[(\rho_q + z_0 \sin \gamma) \sqrt{\varepsilon(\theta_q)} - B_q \right] \right\}} \times \frac{\rho_q + z_0 \sin \gamma}{\sqrt{\rho_q \sin \gamma \cos \gamma}} \exp \left[2ik_0 L_q + i\frac{\pi}{2} \delta \right] \exp \left[-\frac{v_{\text{эфф}} \Phi^2}{2c} \int_{r_q}^a \frac{\sqrt{m^2 + r^2 - 2\Phi^2}}{r^2 \sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr \right], \quad (15)$$

где $\delta = \text{sign}\left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2}\right)$, если $\Delta > 0$ и $\delta = 0$, если $\Delta < 0$,

$$\Delta = \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2} \right) \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \varphi^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho \partial \varphi} \right)^2 - \text{гессиан.}$$

$$\vec{E}_{\text{сп}} = \frac{e^{ikR}}{2R \sqrt{\pi k_0 a \sin \gamma}} \sum_j^2 \left(\frac{\sqrt{p_{ij}} Z_j(z_0)}{D_j \sqrt{r_j^2 - m_j^2}} \right) \left\{ \begin{array}{l} f(\alpha_j) \\ -g(\alpha_j) \end{array} \right\} \times \exp \left[2ik_0 L_j \pm i\frac{\pi}{4} \right] \exp \left[-\frac{v_{\text{эфф}} \Phi^2}{2c} \int_{r_j}^a \frac{\sqrt{m^2 + r^2 - 2\Phi^2}}{r^2 \sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr \right], \quad (16)$$

$$\text{где } p_{ij} = \frac{\sqrt{m_j^2 - \Phi^2(\Theta_j)}}{a \cos \gamma}.$$

Выражение (15) определяет поле, отраженное от «блестящих» точек на поверхности диска, где выполняется условие стационарности фазы $\nabla L = 0$.

Выражение (16) описывает поле, рассеянное от «светящихся» краевых точек на контуре диска, в которых выполняется условие стационарности $\frac{\partial L}{\partial l} = 0$, где l – длина контура. Это условие эквивалентно обобщенному закону отражения геометрической теории дифракции $(\vec{\tau} \vec{t}) = 0$, где $\vec{\tau}$ – единичный вектор, касательный

к контуру диска. Входящие в (16) функции f и g характеризуют диаграмму полной краевой волны, излучаемой от ребра соответствующего клина [4]

$$f(\alpha_j) = \left(\frac{1 + \cos \alpha_j}{2 \cos \alpha_j} \right), \quad (17)$$

$$g(\alpha_j) = - \left(\frac{1 - \cos \alpha_j}{2 \cos \alpha_j} \right), \quad (18)$$

$$\alpha_j = \psi_j \pm \gamma, \quad (19)$$

$$\psi_j = \arccos \left\{ \frac{(z_0 - \rho \sin \varphi \sin \gamma) \sqrt{m^2 - \Phi^2} - r \sin \theta \sqrt{r^2 - m^2}}{r \sqrt{r^2 - \Phi^2}} \right\}, \quad (20)$$

где α_j - угол между касательной к лучу и плоскостью диска.

В выражениях (16), (19) верхний знак применяется для краевой точки с $\varphi = \frac{3\pi}{2}$, нижний

- для $\varphi = \frac{\pi}{2}$. D_j определяется из выражения (7)

при $m = m_j$ и $\rho = d$ при этом m_j определяется из уравнения траектории луча (10) при $\rho = d$,

$$\varphi_1 = \frac{3\pi}{2}, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2}, \quad m_1 \left(\varphi = \frac{3\pi}{2}, d \right), \quad m_2 \left(\varphi = \frac{\pi}{2}, d \right).$$

Необходимо отметить, что в общем случае, на диске существует две «светящихся» краевых точки, но при определенных углах γ краевая точка при $\varphi = \frac{\pi}{2}$ может оказаться в области

каустической тени и тогда амплитуда поля, рассеянного этой точкой, не будет учитываться при вычислении общего поля рассеяния. Выражения для определения вклада краевых точек в общее поле рассеяния справедливы для углов облучения, удовлетворяющих условию

$$k_0 d \sin \gamma \square 1. \quad (21)$$

В случае однородной среды это неравенство является условием асимптотического представления стоящей в выражении для рассеянного поля функции Бесселя J_1 [4].

Для вычисления координат «блестящих» точек на поверхности диска необходимо решить систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \nabla_\rho L(\rho, \varphi) &= 0 \\ \nabla_\varphi L(\rho, \varphi) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

В результате получим

$$\varphi_1 = \frac{3\pi}{2}, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2},$$

$$m_0^2 = (\rho_0 - z_0 \sin \varphi \sin \gamma)^2 \varepsilon(\rho_0, \varphi_{1,2}) + \Phi^2(\rho_0, \varphi_{1,2}). \quad (23)$$

Подставляя (23) в (10), получим

$$\int_0^{\arccos \left(\frac{z_0 - \rho_0 \sin \varphi \sin \gamma}{r_0} \right)} \frac{m_0}{\sqrt{m_0^2 - \Phi^2(\theta)}} d\theta = \arcsin \frac{m_0}{r_0}. \quad (24)$$

Таким образом, условием наличия «блестящих» точек на поверхности диска является существование решения уравнения (24).

При $\varphi = \frac{\pi}{2}$ уравнение (24) не имеет решений, а при $\varphi = \frac{3\pi}{2}$, как и в случае сферически

симметричного плазменного образования [5], уравнение (24) имеет не более двух решений, что наглядно видно из рисунка 2.

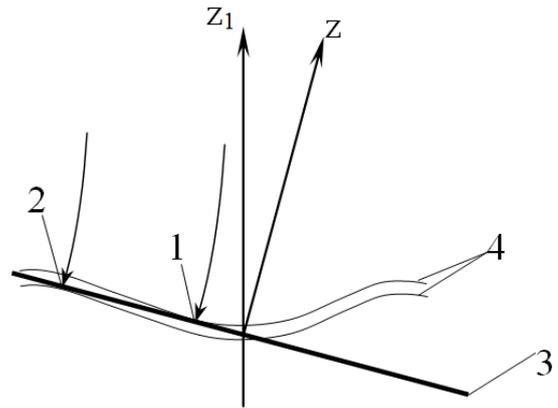


Рис. 2. Формирование «блестящих» точек на поверхности диска
1 – «блестящая» точка первого рода,
2 – «блестящая» точка второго рода,
3 – плоскость диска,
4 – образующие поверхности равных фаз
 $L = \text{const}_{1,2}$

При изменении угла γ изменяется количество и тип «блестящих» точек. При $\gamma = 0$ существует одна «блестящая» точка 1 рода, которая совпадает с центром диска. При увеличении угла γ данная точка смещается к краю диска, а также в зависимости от значений z_0 , d , γ на краю диска появляется «блестящая» точка 2 рода, которая смещается к центру диска при увеличении угла γ .

При некотором угле $\gamma_{\text{кр}}$ обе точки сливаются в одну «блестящую» точку параболического типа. При этом выражение (15) утрачивает

ет справедливость и необходимо иное асимптотическое разложение. Требуемое разложение получено в [6] с использованием приема последовательного применения метода стационарной фазы с разложением до 3-го порядка, так как в рассматриваемой точке параболического типа $\left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2}\right) = 0$.

Рассмотрим облучение диска вдоль оси z_1 ($\gamma = 0$). Данный случай показан на рисунке 3. В этом случае существует одна «блестящая» точка первого рода, которая совпадает с центром диска. При этом вклад этой точки в рассеянное поле будет определяться выражением (15), в котором необходимо раскрыть неопределенность вида $\frac{0}{0}$, в результате получим

$$\vec{E}_{\vec{a}\alpha}(0) = \vec{e}_0 \frac{e^{ik(R+2L_0)}}{2R} \cdot \frac{2\sqrt{\alpha}}{\text{sh}(2\sqrt{\alpha}X)} K(z_0) \times \exp\left[-\frac{v_{\text{эфф}}\Phi^2}{2c} \int_{z_0}^a \frac{\sqrt{m^2 + r^2 - 2\Phi^2}}{r^2\sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr\right], \quad (25)$$

где $K(z_0) = \frac{1}{1 - \frac{z_0\sqrt{\varepsilon(0)}}{\sqrt{\alpha}} \text{th}(\sqrt{\alpha}X)}$ и $X = \arcsin \frac{1}{z_0}$.

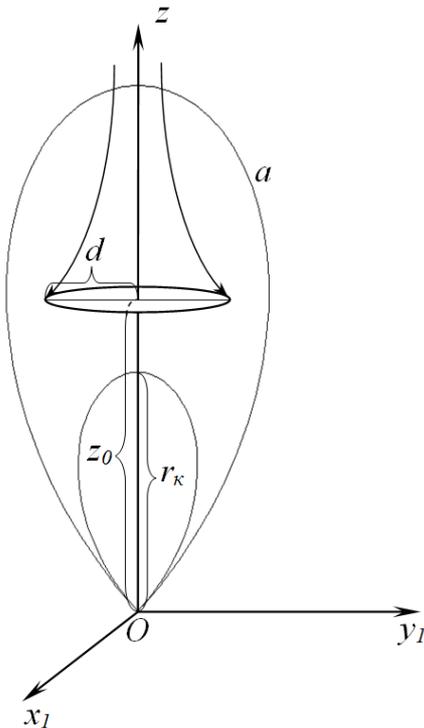


Рис. 3. Схема облучения диска при $\gamma = 0$

Второй составляющей, вносящей вклад в общее поле рассеяния при облучении по нор-

мали к плоскости диска, является весь контур диска. Данное слагаемое определяется выражением:

$$\vec{E}_{\text{кр}}(0) = \vec{e}_0 \frac{e^{ik(R+2L)}}{2R} \frac{\sqrt{r_d^2 - \Phi^2(\theta_d)}}{D_d \sqrt{r_d^2 - m_d^2}} [f(\psi_d) - g(\psi_d)] \times \exp\left[-\frac{v_{\text{эфф}}\Phi^2}{2c} \int_{\sqrt{z_0^2+d^2}}^a \frac{\sqrt{m^2 + r_d^2 - 2\Phi^2(\theta_d)}}{r_d^2 \sqrt{r_d^2 - \Phi^2(\theta_d)}} dr\right], \quad (26)$$

где $f(\psi_d) - g(\psi_d) = \frac{r_d^2 \sqrt{r_d^2 - \Phi^2(\theta_d)}}{r \sqrt{m_d^2 - \Phi^2(\theta_d) - a \sqrt{r_d^2 - m_d^2}}}$.

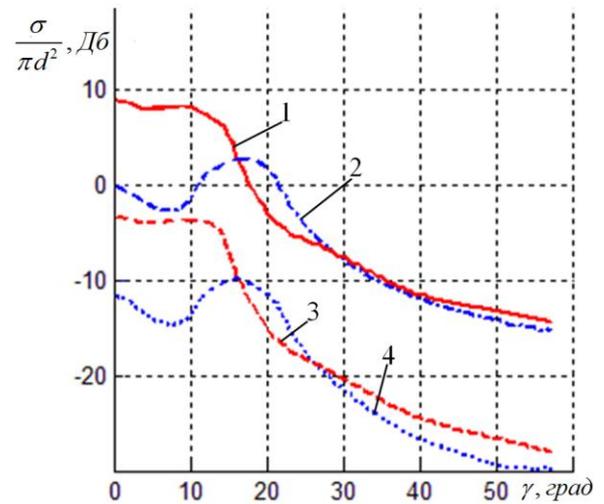


Рис. 4. Диаграммы ЭПР диска в плазменном образовании (Е-поляризация)
1 – без поглощения при $z_0=1,5$;
2 – без поглощения при $z_0=1,2$,
3 – с поглощением при $z_0=1,5$;
4 – с поглощением, при $z_0=1,2$.

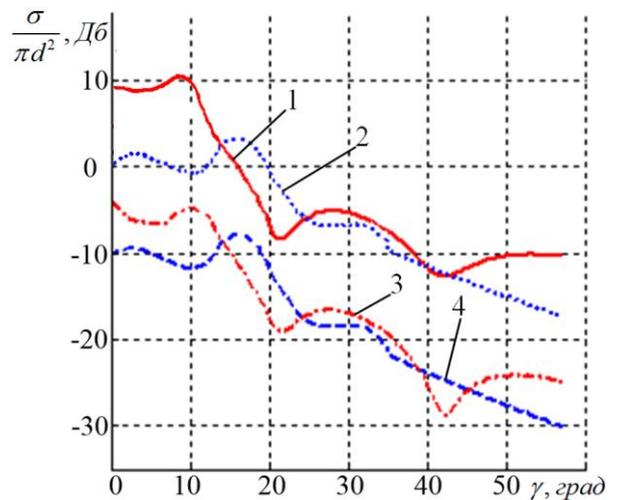


Рис. 5. Диаграммы ЭПР диска в плазменном образовании (Н-поляризация)
1 – без поглощения при $z_0=1,5$;
2 – без поглощения при $z_0=1,2$,
3 – с поглощением при $z_0=1,5$;
4 – с поглощением, при $z_0=1,2$.

На основе выше приведенных выражений были проведены расчеты диаграммы эффективной площади рассеяния диска, расположенного в поглощающем плазменном образовании, при различных значениях смещения z_0 с учетом поглощения и без него. Расчеты проводились при условии $k_0 d = 6,6$, $v_{эфф} = 2 \cdot 10^9$.

Анализ диаграмм ЭПР диска показывает, что положение максимума диаграммы смещается в зависимости от z_0 в связи с тем, что большой вклад в общее поле рассеяния вносят «блестящие» точки, появляющиеся на диске при увеличении γ . При увеличении z_0 влияние плазменного образования снижается и диаграмма приобретает вид диаграммы рассеяния в однородной среде [4]. Также плазменное образование значительно снижает уровень отраженных от диска сигналов и чем ближе диск расположен к центру плазменного образования, тем больше происходит поглощение электромагнитных волн. Необходимо отметить, что при $z_0 = 1,2$ и углах поворота диска более 35 градусов «светящаяся» точка с координатами $\rho = \pi/2, d$ оказывается в области каустической тени и не участвует в формировании общего

поля рассеяния, поэтому на диаграммах в указанном диапазоне углов поворота диска отсутствуют осцилляции.

Литература

1. Колычев, С.А. Строгое решение скалярной задачи дифракции плоской волны на протяженных двумерно-неоднородных плазменных образованиях, содержащих металлическую сферу или цилиндр [Текст] / С. А. Колычев, А. П. Ярыгин // Радиотехника и электроника. – 1984. - Т. 29, № 1. - С. 5-11.
2. Ярыгин, А. П. Диаграмма эффективной поверхности рассеяния металлического диска, расположенного в плазменном образовании с радиальной и угловой неоднородностью [Текст] / А. П. Ярыгин // Радиотехника. – 2001. – №6. – С. 87-90.
3. Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред [Текст] / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов – М.: Наука, 1980, 304 с.
4. Уфимцев, П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Советское радио, 1962. – 244 с.
5. Косенков, А.Н. Дифракция электромагнитных волн на идеально проводящем цилиндре [Текст] / А. Н. Косенков, А. П. Ярыгин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. -Т. 10, № 4 - С. 93-99.
6. Ярыгин, А. П. Вопросы дифракции электромагнитных волн на телах, расположенных в плавно неоднородной среде, возникающие в некоторых задачах радиоэлектронной защиты объектов [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук / А. П. Ярыгин. – Воронеж, 1970, 141 с.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES ON THE DISK, LOCATED IN A TWO-DIMENSIONAL INHOMOGENEOUS ABSORBING PLASMA FORMATION

A.N. Kosenkov, A.P. Yarygin

The results of research of influence absorbing properties of plasma formation with radial and angular inhomogeneity on the diffraction of electromagnetic waves by a perfectly conducting disk. It is shown that the absorbing plasma formations allows skew diagram backscattering object placed in this formation

Key words: plasma formation, the eikonal, cylinder

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТОВ ГАУССА

С.В. Дворников, С.С. Манаенко

В статье представляются материалы по исследованию помехоустойчивости фазоманипулированных сигналов на основе фрагментов вейвлетов Гаусса при воздействии сосредоточенной по спектру помехи. Обосновываются процедуры их синтеза. Рассматриваются энергетические параметры модулирующих фрагментов и анализируются результаты компьютерного моделирования

Ключевые слова: синтез сигналов, помехоустойчивость, вейвлет Гаусса

Вопросам поиска подходов к повышению помехоустойчивости сигналов всегда уделялось особое внимание. Прежде всего, это связано с необходимостью достоверной передачи информации по радиоканалам в условиях шумов и сосредоточенных по спектру помех различной интенсивности.

Среди широко известных модуляционных форматов наибольшей помехоустойчивостью обладают сигналы двухпозиционной фазовой манипуляции (ФМ-2) [1]. Между тем, в радиотехнике в последнее время широкое распространение получили различные методы кратномасштабного анализа на основе вейвлет-функций (в дальнейшем вейвлетов). В частности, фрагментарность и временная локализация вейвлетов Гаусса позволяет предположить о возможности синтеза на их основе различных фазоманипулированных сигналов [2].

Вопросы повышения помехоустойчивости за счет использования базисов формирования сигналов отличных от гармонических рассматривались в [3], где предлагался синтез сигналов в базисах функций сплайн-Вилленкина – Крестенсона (СВКФ), которые являются обобщающими по отношению к гармоническим функциям Фурье. Один из результатов работы [3] заключался в том, что авторам удалось установить эффект структурной скрытности, когда сигнал, сформированный в базисе СВКФ, будет иметь все внешние признаки модулированного колебания, синтезированного в гармоническом базисе. Однако анализ такого сигнала на основе процедур преобразования Фурье не позволит получить значение истинных параметров, т.е.

правильно осуществить демодуляцию и извлечь вложенную в сигнал информацию.

В связи с этим целью статьи является оценка помехоустойчивости сигналов ФМ-2 на основе вейвлетов Гаусса в канале с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) при воздействии сосредоточенной по спектру помехи.

В качестве модуляционного формата была выбрана двухпозиционная фазовая манипуляция. Здесь и далее под модуляционным форматом будем понимать совокупность манипуляции и скорости передачи сигнала.

В формате ФМ-2 скорость передачи определяется минимальной длительностью сигнала τ_c , в пределах которой его фаза остается постоянной. Указанный интервал в [1] определен как элемент сигнала ФМ-2. С рассмотренных позиций синтез сигналов ФМ-2 определяется следующей последовательностью действий. Формируется несущее колебание, которое манипулируется информационной последовательностью логических нулей и единиц.

Учитывая, что сигнал ФМ-2 представляет собой совокупность повторяющихся элементов (радиоимпульсов с различной начальной фазой), соответствующих логическим нулям и единицам, предлагается следующий подход к его синтезу.

На первом этапе формируются элементы сигнала (радиоимпульсы) $s_1(t)$ и $s_0(t)$, соответствующие логическим нулю и единице (см. рис.1). Длительности элементов τ_c выбираются таким образом, чтобы соответствовать требуемой скорости манипуляции $\nu = 1/\tau_c$.

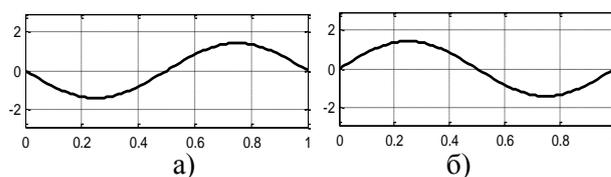


Рис. 1. Элементы сигнала ФМ-2:
а – логической единицы; б – логического нуля

Дворников Сергей Викторович – ВАС им. С.М. Буденного, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-905-275-50-02, e-mail: practicsdv@yandex.ru

Манаенко Сергей Сергеевич - ВАС им. С.М. Буденного, канд. техн. наук, тел. 8-911-121-93-80, e-mail: manaenkoss@mail.ru

На втором этапе, согласно информационной последовательности, из сформированных элементов сигнала $s1(t)$ и $s0(t)$ синтезируется сигнал ФМ-2.

Рассмотренный подход открывает возможности по синтезу вейвлет-сигналов формата ФМ-2. Действительно, в качестве элементов сигнала $s1(t)$ и $s0(t)$ можно определить фрагменты вейвлета Гаусса $\psi(t)$ с различной начальной фазой.

Аналитически вейвлет Гаусса описывается следующим выражением [4]:

$$\psi(t) = (-1)^m \partial_t^m \exp(-t^2 / 2).$$

где $\partial_t^m = \partial^m [\dots] / \partial t^m, m \geq 1$.

Анализ выражения (1) указывает на локализованный характер функции, т.е. формируемый вейвлет представляет собой радиоимпульс. Так, на рис. 2 представлены элементы сигнала $\psi1(t)$ и $\psi0(t)$, сформированные на основе вейвлета Гаусса первого порядка ($m = 1$).

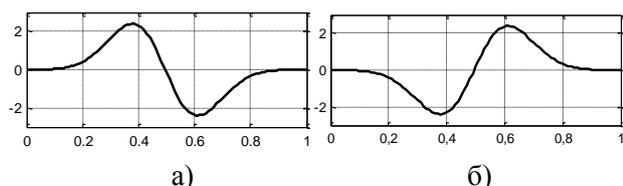


Рис. 2. Элементы вейвлет-сигнала: а – логической единицы; б – логического нуля

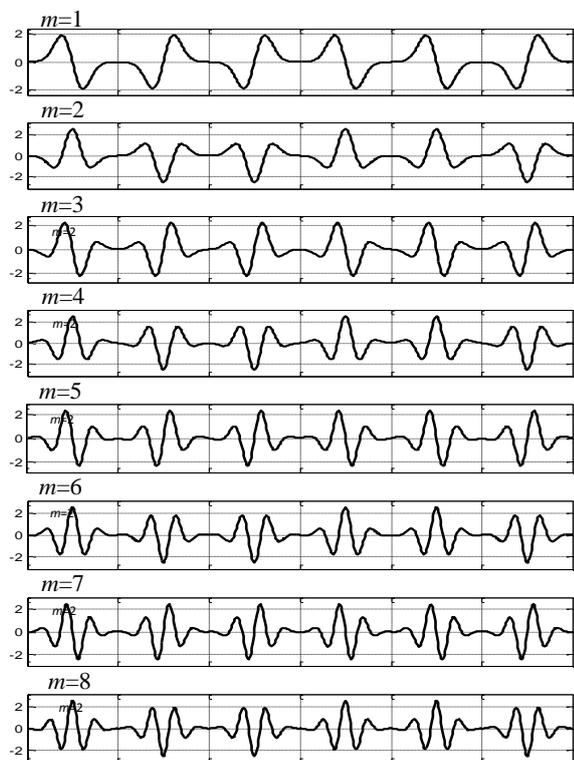


Рис. 3. Сигналы ФМ-2 на основе вейвлетов Гаусса различных порядков ($m = 1 \div 8$.)

Двусторонняя временная структура позволяет на основе вейвлетов Гаусса формировать колебания, из которых можно синтезировать сигналы формата ФМ-2. На рис. 3 показаны фрагменты ФМ-2 сигналов, сформированных на основе вейвлетов Гаусса различных порядков.

Для оценки помехоустойчивости вейвлет-конструкции был определен канал с АБГШ, в котором действует сосредоточенная по спектру помеха. На рис. 4 представлен фрагмент эксперимента по оценке помехоустойчивости сигнала ФМ-2 на основе вейвлета Гаусса 1-го порядка в условиях воздействия сосредоточенной по спектру помехи.

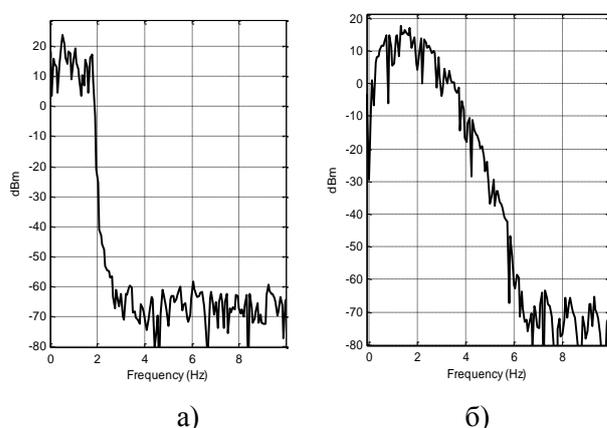


Рис. 4. Спектральное представление помехи (а) и исследуемого сигнала ФМ-2 на основе вейвлета Гаусса 1-го порядка (б)

Моделирование проводилось в среде Simulink программы MatLab. Программная реализация модели для оценки помехоустойчивости вейвлет-сигналов, обрабатываемых в базе вейвлет-функций, представлена на рис. 5, где в блоке Modulator WS формируются фазоманипулированные сигналы на основе вейвлетов Гаусса, в блоке Demodulator WS на приеме осуществляется их демодуляция, в блоке Помеха формируется помеха (см. рис. 4а).

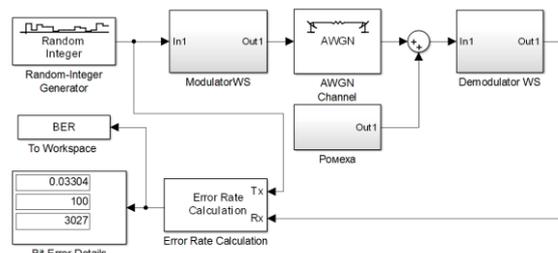


Рис. 5. Программная реализация модели в среде Simulink

На рис. 6 показаны графики, характеризующие зависимость вероятности битовой ошибки P_b от значения отношения мощности сигнала к

спектральной плотности мощности шума (ОСШ) h^2 для сигналов ФМ-2 на основе фрагментов вейвлетов, синтезированных в соответствии с рассмотренным подходом.

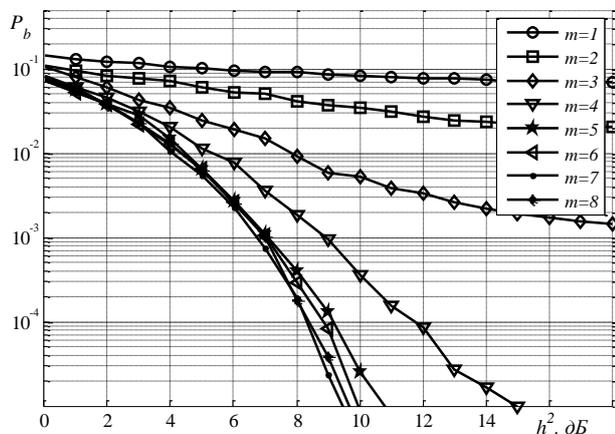


Рис. 6. Зависимость вероятности ошибки на бит от ОСШ для сигналов ФМ-2 на основе вейвлетов Гаусса различных порядков

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод. Помехоустойчивость вейвлет-сигналов в канале с АБГШ при воздействии узкополосной сосредоточенной по спектру помехи зависит от вида вейвлета. В частности, она определяется порядком дифференцирования исходной функции Гаусса.

Указанный эффект обусловлен смещением спектра вдоль частотной оси.

При этом основные технические параметры модулированного сигнала (скорость передачи, спектральная плотность мощности, длитель-

ность элементарной посылки и др.) сохраняются [5]. Следовательно, выбор модулирующего вейвлета (порядка вейвлета) в процессе передачи, позволяет оперативно обеспечивать требуемый уровень помехоустойчивости в условиях воздействия сосредоточенных по спектру помех.

Так, при прочих равных условиях, существенный эффект достигается при переходе от вейвлетов 1-го, 2-го порядка, к вейвлетам 5-го порядка и выше (см. рис. 6).

Дальнейшие исследования авторы связывают с вопросами оценки помехозащищенности сигналов, сконструированных на основе вейвлетов различных порядков в условиях преднамеренных прицельных помех.

Литература

1. Прокис Дж. Цифровая связь. [Текст]: пер. с англ. / под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.
2. Синтез фазоманипулированных вейвлет-сигналов / [Текст] / С.В. Дворников, С.С. Манаенко, А.А. Погорелов, С.С. Дворников // Информационные технологии. – 2015, № 2. – С. 140-143.
3. Агиевич, С.Н. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Вилленкина – Крестенсона [Текст] / С.Н. Агиевич, С.В. Дворников, А.С. Гусельников // Контроль-Диагностика. – 2009, № 3. – С. 52–57.
4. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Яковлев.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
5. Автоматизированная система контроля интенсивности физических полей рассеивания сигналов [Текст] / А.А. Алексеев, С.В. Дворников, В.К. Железняк, В.Ф. Комарович. - Научное приборостроение. – 2000. - Т. 10, № 3. - С. 77-87

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г.Санкт-Петербург

NOISE IMMUNITY PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS BASED ON WAVELET GAUSS

S.V. Dvornikov, S.S. Manaenko

The paper presents the study of materials on noise immunity phase-shift keyed signals based on wavelet Gauss. Settle the procedure for their synthesis. We consider the energy parameters modulating fragments and analyzed the results of computer simulation

Key words: synthesis signals, noise immunity, Gauss wavelet

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РЕЖИМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Д.В. Асотов, В.И. Маслов, Л.Ш. Голоскокова

В статье проведён анализ принципов организации и особенностей функционирования региональных беспроводных сетей передачи данных (БСПД). Разработаны предложения по блокированию возможности приёма информации. Показана возможность повышения надёжности в БСПД стандарта IEEE 802.16 (WiMAX) на основе использования Mesh-сетей в децентрализованном режиме функционирования

Ключевые слова: беспроводные системы передачи данных, контролируемая зона, блокирование радиоприемных устройств

Блокирование возможности приёма информации, передаваемой по основному каналу на рабочей частоте региональных БСПД, с использованием блокираторов радиоприемных устройств невозможно, так как часть оборудования БСПД, например, базовая станция (БС), находится за пределами контролируемой зоны (КЗ). Указанное обстоятельство обуславливает необходимость поиска новых способов и средств, блокирования возможности приёма информации в региональных БСПД несанкционированными устройствами. В связи с этим теоретические и практические вопросы определения возможности приёма информации устройствами региональных БСПД с предотвращением утечки по ТК являются весьма актуальными, особенно с учетом разнообразия существующих типов региональных БСПД. Целью настоящей статьи является системный анализ принципов организации и режимов функционирования региональных БСПД и разработка на этой основе предложений по способам и средствам, обеспечивающим повышение уровня конфиденциальности информации, циркулирующей в отдельных фрагментах региональной сети. Анализ особенностей функционирования региональной БСПД с использованием оборудования стандарта IEEE 802.16 в режиме OFDM (модуляция сигнала с ортогональным частотным мультиплексированием) показал, что в этом случае может быть обеспечена организация Mesh-сети (отдельно взятого фрагмента региональной сети, функционирующего децентрализованно). Децентрализованное распределение ресурсов в Mesh-сети происходит в пределах одной группы соседних абонентских станций (АС), находящихся в пределах границ КЗ (т.е. взаимодействие осуществляется непосредственно между АС) [1].

Абонентские станции передают сообщения в отведенные им временные интервалы (в соответствии с предшествующим назначением каналов), чтобы получают доступ к каналам произвольным

(конкурентным) образом. Каждый узел Mesh-сети хранит список данных обо всех соседних АС (с указанием удаленности, сектора для направленной антенны, примерной необходимой мощности передатчика для связи, задержки распространения сигнала) и транслирует его в сеть с заданной периодичностью. При этом каждый узел должен хранить данные о максимально допустимой мощности излучения АС, при которой невозможен приём сигнала с использованием оборудования стандарта IEEE 802.16.

Используя рассмотренные выше особенности функционирования Mesh-сети, можно предложить способ повышения уровня конфиденциальности информации в региональной БСПД за счет организации Mesh-сетей, размещенных в пределах КЗ. При этом передача трафика между отдельными АС осуществляется без использования восходящих и нисходящих каналов беспроводной сети. Уровни радиоизлучений оборудования АС внутри Mesh-сети должны обеспечивать устойчивый информационный обмен между АС и в то же время исключать приёма информативных сигналов в диапазоне рабочих частот за пределами КЗ. Это может быть реализовано путем рационального выбора местоположения и пространственных характеристик антенных систем АС, а также за счет использования экранирующего действия стен здания и помещений, других элементов строительных конструкций (двери и окна).

На рис. 1 приведен один из возможных вариантов использования Mesh-сети, функционирующей в децентрализованном режиме, для предотвращения возможности приёма информации в региональной БСПД за границами КЗ. Кроме того, на рис. 1 проиллюстрирован один из возможных способов применения блокираторов для подавления радиоприемных устройств, созданных на основе технологии стандарта IEEE 802.16. В этом случае блокиратор размещается на направлении возможного приёма и как можно ближе к границе КЗ. В нем должна быть обеспечена возможность регулировки уровня мощности излучения помехи. В блокираторе должна использоваться секторная антенна, ориентированная в сторону возможного направления приёма. Подобные блокираторы целесообразно устанавливать на крыше здания, в помещениях которого размещены АС Mesh-сети (АС № 4 – АС № 7, рис. 1).

Асотов Дмитрий Валериевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: asotov.vgtu@mail.ru, тел. 8-951-540-52-05

Маслов Владимир Иванович – ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8-903-851-70-14

Голоскокова Людмила Шамильевна – ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8-952-553-75-57

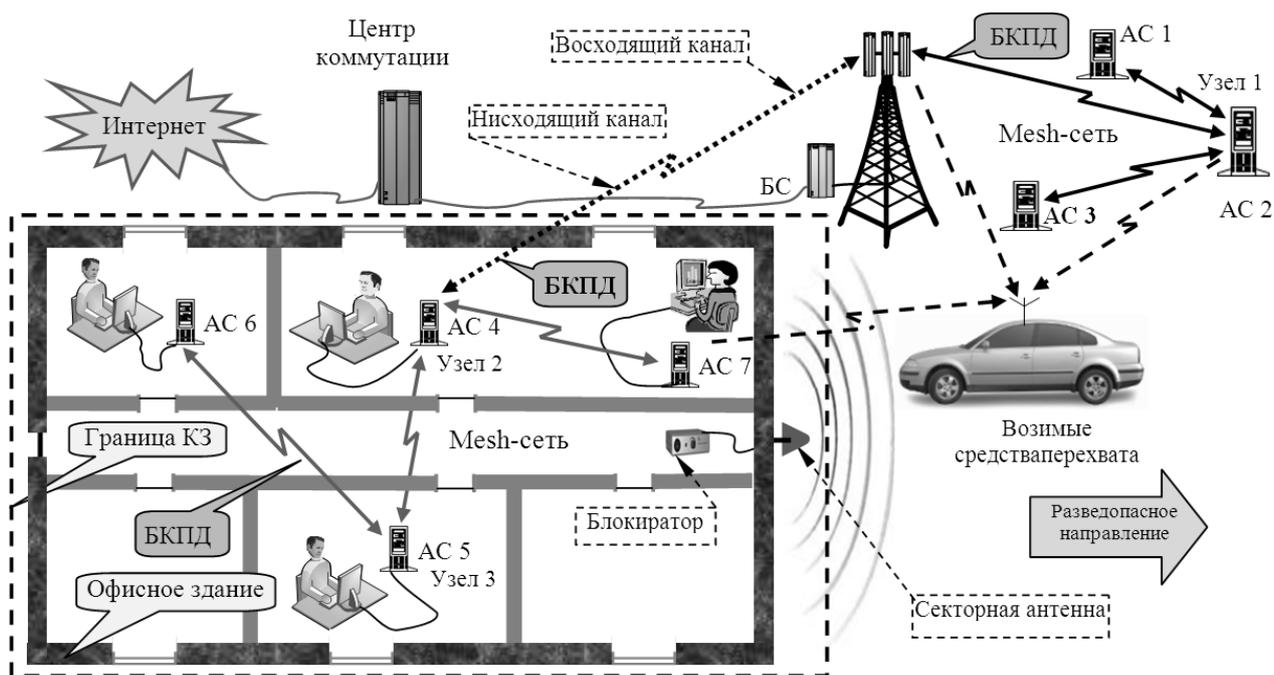


Рис. 1. Иллюстрация способа повышения уровня надежности передачи информации в Mesh-сети, функционирующей в децентрализованном режиме в составе региональной БСПД

Использование блокираторов, благодаря возможности манипулирования их размещением и уровнем мощности излучаемых помех, позволяет управлять величиной отношения сигнал-помеха на входе приемников перехвата в широком диапазоне, добиваясь их блокирования на требуемых расстояниях. Одновременно можно исключить блокирование приемных устройств AC Mesh-сети (например, AC № 7, рис. 1) за счет применения таких методов, как пространственный разнос защищаемого оборудования БСПД и блокиратора с учетом конструктивных особенностей помещений, в которых они размещены, использования экранирующего действия стен помещения (здания), а также применения в блокираторах направленных антенн.

При реализации данного способа обработки информации в БСПД необходимо руководствоваться действующими нормативно-методическими документами по электромагнитной совместимости Государственной комиссии по радиочастотам России.

При оценке экранирующего действия строительных конструкций можно воспользоваться результатами экспериментов [2]. По этим данным ослабление радиоволн в 5-ГГц диапазоне в типовых строительных конструкциях соответствует следующим значениям: а) кирпичные стены толщиной 700, 250 и 120 мм – соответственно 36, 13 и 6 дБ; б) бетонная стена толщиной 400 мм – 27 дБ; в) межэтажное железобетонное перекрытие – 21 дБ. Ослабление радиоволн происходит и в других элементах строительных конструкций (двери, окна, деревянные перегородки), однако на частотах до 10 ГГц оно не превышает 3...5 дБ. Это существенно меньше, чем в стенах и межэтажных перекрытиях, но также должно быть учтено при оценке защищенности информации, передаваемой между AC Mesh-сети.

Рассмотрим пример реализации способа предотвращения приёма в Mesh-сети, функционирующей в децентрализованном режиме в составе региональной БСПД. Пусть перехват информации, передаваемой между AC Mesh-сети, осуществляется с направления, указанного на рис. 1.

На рис. 2 представлены зависимости значения отношения сигнал-шум по мощности на входе приемника перехвата, расположенного на границе КЗ на расстоянии 60 м от передающего устройства AC Mesh-сети, от значения мощности излучения передатчика для типовых значений параметров сигналов БСПД и различных типовых значений ослабления сигналов за счет влияния строительных конструкций (в интервале от 36 до 4 дБ) применительно к схеме, показанной на рис. 1.

Расчет проводился по формуле:

$$q = \frac{3 \cdot 10^{13} \cdot P_{\text{ПРДС}} \cdot G_{\text{ПРДС}} \cdot \Delta f_c \cdot \tau}{R_C^2 \cdot \Delta f_{\text{ПР}} \cdot E_{\text{ШН}}^2 \cdot k_{\text{ОСЛС}}}, \quad (1)$$

где q – отношение сигнал-помеха по мощности на входе приемника перехвата (приемного устройства Mesh-сети), раз; $P_{\text{ПРДС}}$ – мощность излучаемого сигнала передатчика AC Mesh-сети, мВт; $G_{\text{ПРДС}}$ – значение усиления антенны передатчика AC Mesh-сети в направлении на приемник перехвата (приемное устройство AC Mesh-сети), раз; Δf_c – полоса частот сигнала, излученного передатчиком AC Mesh-сети, кГц; τ – длительность сигнала, соответствующая 1 двоичному символу передаваемой информации, с; $\Delta f_{\text{ПР}}$ – полоса частот приемника перехвата, кГц; $E_{\text{ШН}}$ – значение спектральной плотности напряженности электрического поля нормированно-

го шума приемника на частоте f , $\text{мкВ}(\text{м}\sqrt{\text{кГц}})^{-1}$; R_C – расстояние от передатчика AC Mesh-сети до приемника перехвата, м; $k_{\text{ОСЛС}}$ – коэффициент ослабления сигнала передатчика AC Mesh-сети на расстоянии до приемника за счет неоднородности среды распространения (за счет влияния стен и перегородок здания), раз. Расчет проводился для следующих типовых значений параметров: $G_{\text{ПРДС}} = 1$; $\Delta f_C = 10$ МГц; $\tau = 100$ нс; $\Delta f_{\text{ПР}} = 10$ МГц; $E_{\text{ШН}} = 10 \text{мкВ}(\text{м}\sqrt{\text{кГц}})^{-1}$; $R_C = 60$ м.

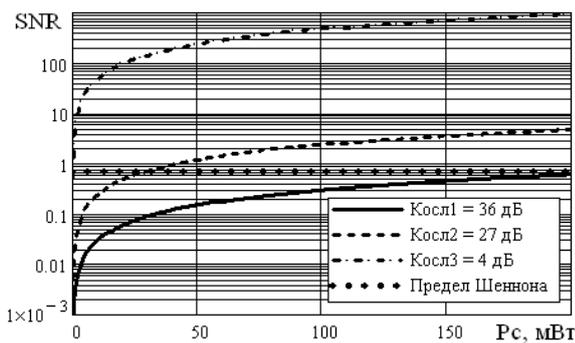


Рис. 2. Отношения сигнал/шум на входе приемника перехвата от мощности излучения AC Mesh-сети

На этом же рисунке горизонтальной линией обозначено пороговое значение отношения сигнал-шум (предел Шеннона, равный $-1,6$ дБ (0,69)), при уменьшении ниже которого поддержание достоверной связи в каналах передачи данных беспроводных сетей невозможно [3].

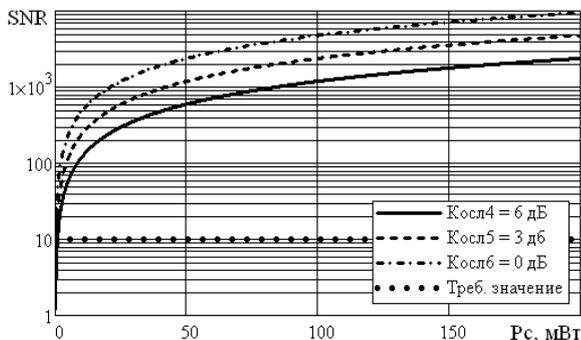


Рис. 3. Отношения сигнал/шум на входе приемника AC от мощности излучения AC Mesh-сети

Анализ кривых, представленных на рис. 2, показывает, что при мощности излучения до 25 мВт передатчика AC Mesh-сети, расположенного внутри кирпичного или железобетонного здания, обеспечивается одновременно предотвращение приёма на границе КЗ (за счет ослабления информативного сигнала строительными конструкциями здания) и устойчивая связь ($q > 10$) между AC Mesh-сети, разнесенными друг от друга на расстояние 30 м внутри здания (рис. 3).

Однако, при условии приёма сигналов в направлениях, соответствующих оконным проемам, ее защита не обеспечивается. В этом случае могут быть применены блокираторы.

Отношение сигнал-помеха на входе радиоприемных устройств на основе оборудования БСПД стандарта IEEE 802.16 при использовании блокиратора для подавления сигнала в точке перехвата рассчитывается по известной из теории радиопротиводействия [4] формуле:

$$q = \frac{P_C}{P_{\text{П}}} = \frac{P_{\text{ПРДС}} \cdot G_{\text{ПРДС}} \cdot R_{\text{П}}^2 \cdot k_{\text{ОСЛП}}}{P_{\text{ПРДП}} \cdot G_{\text{ПРДП}} \cdot R_C^2 \cdot k_{\text{ОСЛС}}} \quad (2)$$

где q – отношение сигнал-помеха по мощности на входе приемника, раз; P_C и $P_{\text{П}}$ – мощности сигнала AC Mesh-сети и помехового сигнала блокиратора на входе приемника перехвата соответственно, мВт; $P_{\text{ПРДС}}$ и $P_{\text{ПРДП}}$ – мощности излучаемого сигнала передатчика AC Mesh-сети и помехового сигнала блокиратора соответственно, мВт; $G_{\text{ПРДС}}$ и $G_{\text{ПРДП}}$ – значения усиления антенны передатчика AC Mesh-сети и блокиратора в направлении на приемник соответственно, раз; R_C и $R_{\text{П}}$ – расстояния до приемника перехвата от передатчика AC Mesh-сети и от блокиратора соответственно, м; $k_{\text{ОСЛС}}$ и $k_{\text{ОСЛП}}$ – коэффициенты ослабления сигнала передатчика AC Mesh-сети и помехового сигнала соответственно на расстояниях до приемника перехвата за счет неоднородности среды распространения (за счет влияния стен и перегородок здания).

На рис. 4 применительно к схеме, показанной на рис. 1, представлены зависимости значения отношения сигнал-шум по мощности на входе приемника, расположенного на границе КЗ на расстоянии 60 м от передающего устройства AC Mesh-сети и на расстоянии 50 м от блокиратора, для типовых значений параметров сигналов БСПД и различных значений ослабления сигналов за счет влияния строительных конструкций (в интервале от 36 до 4 дБ).

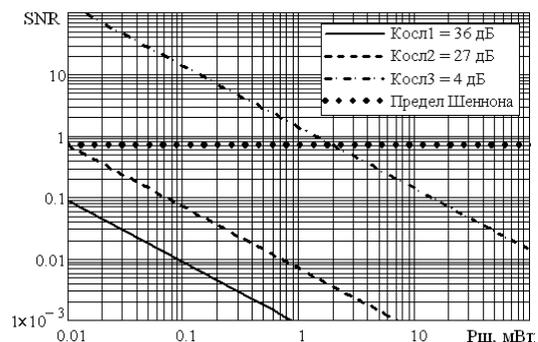


Рис. 4. Отношения сигнал/шум на входе приемника перехвата от мощности излучения блокиратора

Расчет проводился для следующих типовых исходных данных: $P_{\text{ПРДС}} = 25$ мВт; $G_{\text{ПРДС}} = 1$; $G_{\text{ПРДП}} = 5$ (в направлении приемника перехвата); $R_C = 60$ м; $R_{\text{П}} = 50$ м. Анализ зависимостей, представленных на рис. 4, показывает, что при мощности излучения блокиратора, расположенного за пределами кирпичного или железобетонного здания, от 10

мкВт до 100 мВт обеспечивается защита передаваемой информации от перехвата на границе КЗ. Однако, при условии приёма информации от АС Mesh-сети с направлений, соответствующих оконным проемам, мощность излучения блокиратора для обеспечения предотвращения приёма должна составлять десятки мВт.

Полученные результаты показывают, что одной из основных задач при оценке защищенности информации внутри Mesh-сети, размещенной в пределах КЗ, является обязательный учет ослабления радиоволн в строительных конструкциях зданий и помещений, а также пространственный разнос защищаемого оборудования БСПД и блокиратора. При этом с целью исключения утечки информативных сигналов АС Mesh-сети в диапазоне рабочих частот за пределы КЗ необходимо выбрать наиболее приемлемые способы защиты оконных проемов.

На основании проведенных исследований принципов организации и особенностей режимов функционирования региональных БСПД стандарта IEEE 802.16 и разработки на этой основе предложений по способам и средствам, обеспечивающим повышение уровня защищенности информации от утечки по ТК, можно сделать следующие выводы.

1. Повышение уровня надёжности Mesh-сети региональных беспроводных систем может быть обеспечено на основе организации децентрализованного режима функционирования абонентских станций Mesh-сети, при котором передача трафика между отдельными АС осуществляется без использования восходящих и нисходящих каналов беспроводной сети. Предложенный способ будет полезен для практического применения при выборе и реализации организационных мероприятий, выбору пассивных и активных способов защиты информации, циркулирующей в отдельных фрагментах региональных БСПД.

2. Одной из основных задач при оценке возможности приёма информации в Mesh-сети является обязательный учет ослабления радиоволн в различных элементах строительных конструкций. Если в помещениях, где размещены АС Mesh-сети, имеются оконные проемы, то необходимо выяснить их функциональную нагрузку: только для освещения или постоянное наблюдение за процессами, происходящими за окном. Исходя из этого и существующей эффективности экранирования помещения с

целью исключения излучения информативных сигналов АС Mesh-сети в диапазоне рабочих частот за пределы КЗ, необходимо выбрать наиболее приемлемые способы защиты оконных проемов, так как на частотах до 10 ГГц ослабление информативного радиосигнала в них не превышает 3...5 дБ.

3. При размещении Mesh-сети внутри типового кирпичного здания, границы которого совпадают с границами КЗ, предотвращается утечка по ТК информации между АС Mesh-сети. Однако, при условии перехвата информации от АС Mesh-сети с направлений, соответствующих оконным проемам, мощность излучения блокиратора для предотвращения приёма передаваемой информации должна составлять десятки мВт.

4. Установлено, что излучение блокираторов не оказывает существенного воздействия на приемные устройства АС Mesh-сети за счет применения таких методов, как пространственный разнос защищаемого оборудования Mesh-сети и блокираторов с учетом конструктивных особенностей помещений, в которых оно размещено, использования экранирующего действия стен помещения (здания), пассивных средств (экранирования и радиопоглощения), а также применения в блокираторах направленных антенн.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант РФФИ №13-08-97538-р-центр-а.)

Литература

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации [Текст] / В.М. Вишневецкий, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович – М.: Техносфера, 2005. – 200 с.
2. Рыжов, А.И. Ослабление сверхширокополосных хаотических сигналов диапазона 3 – 5 ГГц при прохождении через стены зданий [Текст] / Рыжов А.И. и др. // Журнал радиоэлектроники.– 2012, № 5.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] / Б. Скляр. – Москва, Санкт-Петербург, Киев: Вильямс, 2003. – 105 с.
4. Куприянов, А.И.. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы [Текст]: учеб. пособие / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007.- 350 с.
5. Авдеев, В.Б. Методологические аспекты защиты информации в телекоммуникационных и компьютерных сетях общего пользования [Текст] / В.Б. Авдеев, Д.В. Асотов, С.Н. Паньчев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. - Т. 7, № 12.1. - С. 27 – 31.

Воронежский государственный технический университет

Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России, (г. Воронеж)

THE DECENTRALISED FUNCTIONING MODE USED IN WIRELESS NETWORKS OF DATA TRANSMISSION FRAGMENTS

D.V. Asotov, V.I. Maslov, L.Sh. Goloskokova,

In article the organization and features principles analysis of regional data transmission wireless networks functioning is carried out. Offers on information protection circulating in them against leak channels are developed. Increase information protection possibility is shown of the in WNDT IEEE 802.16 on uncentralised Mesh-networks mode functioning is basis

Key words: wireless data transmission systems, controllable zone, radio intakes of interception means blocking

ОЦЕНКА ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АСМУЭ ФКС

А.Л. Каштанов, О.О. Комякова

Внедрение автоматизированных систем учета электроэнергии на тяговых подстанциях позволяет получить дополнительные возможности при разработке управленческих решений, направленных на повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения. В статье рассмотрен метод по оценке перетоков мощности в тяговой сети постоянного тока, а также алгоритм обработки данных с целью мониторинга потерь электроэнергии, вызванных перетоком мощности в моменты времени отсутствия на межподстанционной зоне электроподвижного состава

Ключевые слова: тяговая подстанция, автоматизация, энергоэффективность, переток мощности

Анализ результатов реализации Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г позволяет отметить, что за последние годы структура энергобаланса ОАО «РЖД» претерпела существенные изменения. Основным видом потребляемых энергоресурсов все в большей степени становится электрическая энергия. Затраты электроэнергии на тягу поездов составляют 57,6 % в общем объеме потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в ОАО «РЖД». Таким образом повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения (СТЭ) во многом определяет снижение величины затрат на ТЭР в общих эксплуатационных затратах ОАО «РЖД».

В настоящее время внедрение автоматизированных систем учета электроэнергии на тяговых подстанциях, а также разработка алгоритмов обработки получаемой ими информации становится одним из основных инструментов при разработке рекомендаций, направленных на снижение потерь электроэнергии [1, 2].

На участках железных дорог, электрифицированных на постоянном токе, тяговая сеть представляет собой неразрывную цепь, участки которой соединены по шинам 3,3 кВ тяговых подстанций и тем самым обеспечивая возможность перетока мощности из смежных межподстанционных зон (МПЗ).

К основным причинам, влияющим на появление перетоков мощности в тяговой сети, можно отнести следующие:

наличие на участке электроподвижного состава движущегося в режиме рекуперативного торможения;

различие уровней напряжения на шинах 3,3 кВ смежных тяговых подстанций;

различные режимы работы и характеристики оборудования смежных тяговых подстанций.

Перетоки мощности в тяговой сети, в частности в момент отсутствия поездов на участке, приводят к возникновению дополнительных технических потерь электрической энергии, и тем самым ухудшают показатели эффективности работы СТЭ. До настоящего времени на тяговых подстанциях постоянного тока приборы учета устанавливались только на вводах преобразовательных трансформаторов, и оценить величину перетока мощности по шинам 3,3 кВ не представлялось возможным.

В 2014 г. в рамках реализации инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» была разработана и внедрена на опытном полигоне Шаля – Подволошная Свердловской железной дороги автоматизированная система мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети (АСМУЭ ФКС). Внедрение АСМУЭ ФКС предусматривает установку информационно-измерительных комплексов (ИИК) на вводах выпрямительно-преобразовательных трансформаторов и фидерах контактной сети (ФКС). Система АСМУЭ ФКС предназначена для обеспечения контроля, управления и повышения энергетической эффективности работы СТЭ за счет наличия функций измерения напряжений и токов, учета активной энергии в прямом и обратном направлении, выявления потерь электрической энергии в контактной сети и оборудовании тяговых подстанций [3, 4].

К основным информативным параметрам системы относятся:

напряжение, ток (со знаком), значение активной мощности (со знаком) по ФКС и вводам

Каштанов Алексей Леонидович – ОмГУПС, канд. техн. наук, доцент, тел. (3812) 44-39-23, e-mail: kesh-al@rambler.ru
Комякова Ольга Олеговна – ОмГУПС, канд. техн. наук, доцент, тел. (3812) 44-39-23, e-mail: tskom@mail.ru

3,3 кВ с заданным интервалом времени (3 с; 6 с; 60 с; 30 минут);

приращение активной энергии по ФКС и вводам 3,3 кВ на заданном интервале;

гармонический состав напряжения на заданном интервале времени;

время выполнения измерений с привязкой к системе обеспечения единого времени.

Обладая такими функциональными возможностями, система АСМУЭ ФКС позволяет обеспечить мониторинг перетоков мощности и выполнить расчет технических потерь от их протекания.

Первым критерием наличия перетока мощности является отрицательное значение тока по одному из плеч тяговой подстанции. При этом отрицательный ток может быть обусловлен как наличием в МПЗ электровоза, движущего в режиме рекуперативного торможения, так и перетоком мощности, значение которого необходимо определить.

Вторым критерием перетока мощности в тяговой сети является равенство по модулю и различие по знаку токов по фидерам контактной сети тяговых подстанций, питающих одну и ту же МПЗ.

В качестве третьего критерия, позволяющего выделить ток рекуперации, принимается резкое увеличение уровня напряжения на шинах 3,3 кВ. Следует отметить, что анализ уровня напряжения на тяговой подстанции также позволяет оценивать состояние и эффективность работы приемников избыточной энергии рекуперации и действий локомотивных бригад при применении рекуперативного торможения [5].

Структурная схема участка для оценки перетока мощности приведена на рис. 1.

Величина потерь электрической энергии в тяговой сети рассчитывается по выражению:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot t \cdot (U^{\text{ТП1}} - U^{\text{ТП2}}) \cdot \sum_{k=1}^4 |i_k|, \quad (1)$$

где $U^{\text{ТП1}}$, $U^{\text{ТП2}}$ – действующее значение напряжения шинах 3,3 кВ на соответственно на тяговой подстанции ТП1 и ТП2; i_k – действующее значение тока по k -му ИИК; k – количество ИИК, установленных на ФКС 3,3 кВ.

Программно-аппаратный комплекс АСМУЭ ФКС позволяет реализовать возможность контроля перетоков мощности в тяговой сети в автоматическом режиме. С этой целью предложен алгоритм обработки данных для оценки эффективности работы СТЭ (рис. 2), в основу которого положен расчет потерь электроэнер-

гии в тяговой сети в моменты времени отсутствия нагрузки на МПЗ.

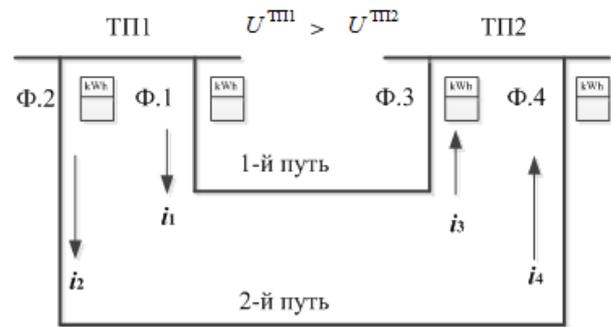


Рис. 1. Структурная схема расчетного участка

Для анализа необходимо объединить токи ФКС четного и нечетного путей в каждой межподстанционной зоне таким образом, что токи I_{12} , I_{34} были равны сумме токов фидеров четного и нечетного путей (см. рис. 1):

$$I_{(12)} = i_1 + i_2. \quad (2)$$

$$I_{(34)} = i_3 + i_4. \quad (3)$$

За положительный принимается ток, направленный от подстанции, на которой установлен ИИК измеряемый данный ток, и в этом случае $sign(i_k) = 1$. В случае изменения направления тока $sign(i_k) = 0$.

При протекании перетоков мощности в тяговой сети токи плеч питания смежных тяговых подстанций разнонаправлены. Данное условие описывается следующим логическим выражением:

$$sign I_{12} \oplus sign I_{34} = 1, \quad (4)$$

где символ \oplus – логическая операция «строгая дизъюнкция», которой соответствует логическая связка «либо – либо».

В случае отсутствия тяговой нагрузки на МПЗ разность токов I_{12} и I_{34} не должна превышать величину допустимой абсолютной погрешности, обусловленной погрешностью учета ИИК:

$$|I_{12} - I_{34}| \leq \Delta I_{\text{нб}}, \quad (5)$$

где $\Delta I_{\text{нб}}$ – предел допустимой погрешности измерения тока:

$$\Delta I_{\text{нб}} = \sum_{k=1}^4 \frac{\delta_k \cdot i_k}{100}, \quad (6)$$

где δ_k – предел допустимой относительной погрешности k -го ИИК, обусловленной погрешностью шунта и измерителя.

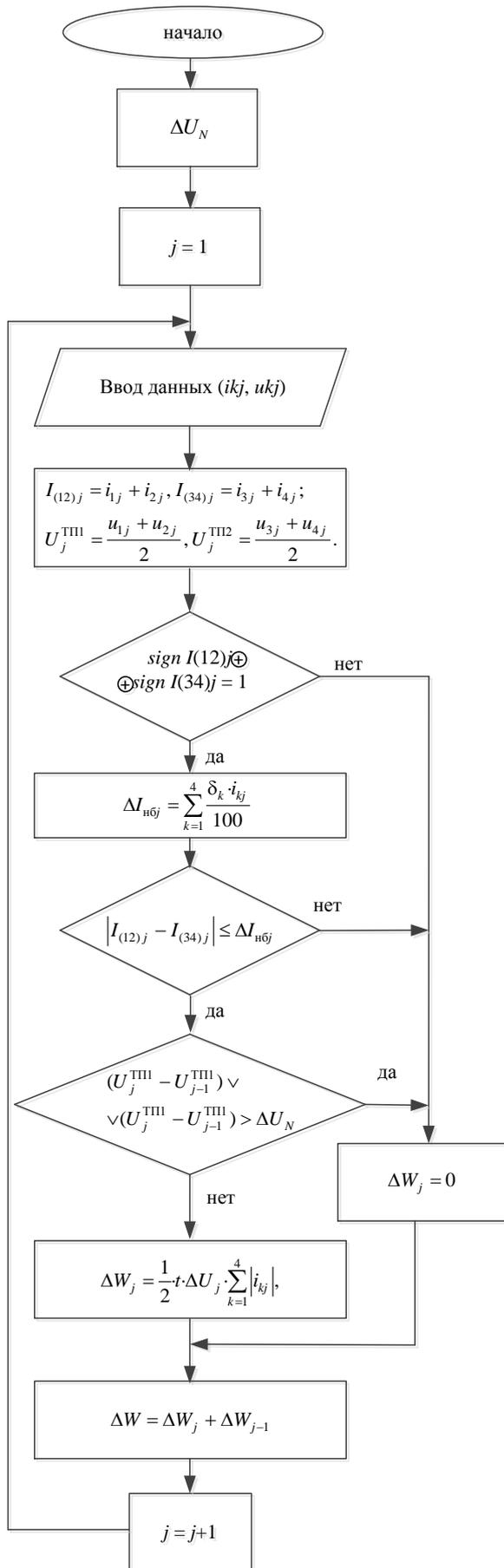


Рис. 2. Алгоритм расчета потерь электроэнергии от протекания перетоков мощности в тяговой сети по данным АСМУЭ ФКС

Дополнительным критерием выделения перетока мощности, обусловленного рекуперативным торможением, является контроль уровня напряжения на шинах 3,3 кВ тяговых подстанций:

$$(U_j^{\text{ТП1}} - U_{j-1}^{\text{ТП1}}) \vee (U_j^{\text{ТП2}} - U_{j-1}^{\text{ТП2}}) > \Delta U_N, \quad (7)$$

где символ \vee – логическая операция «дизъюнкция», которой соответствует логическое выражение «или»; j – временной интервал измерения ИИК АСМУЭ ФКС, ΔU_N – граничное значение напряжения, определяемое на основании опытных данных.

Апробация описанного метода выполнена на действующем участке электрифицированных железных дорог постоянного тока Шаля – Подволошная Свердловской железной дороги.

На рис. 3 приведены графики тока и напряжения на МПЗ Шаля – Сарга для трех различных режимов: переток мощности, тяга и рекуперативное торможение.

В режиме перетока мощности (см. рис. 3а) напряжение на тяговых подстанциях Шаля (U_{12}) и Сарга (U_{34}) составили соответственно 3,62 и 3,58 кВ. При этом токи по ФКС, питающим МПЗ Шаля – Сарга, разнонаправлены и имеют одинаковое значение.

В режиме рекуперативного торможения (см. рис. 3б) напряжение возрастает до 3,76 кВ и при этом наблюдается отрицательные токи по ФКС на обеих тяговых подстанциях. При переходе в режим тяги уровень напряжения снижается до 3,5 – 3,6 кВ, а токи по ФКС меняют свое направление на положительное.

При нахождении на МПЗ одновременно нескольких электровозов возможен случай, когда токи по ФКС смежных тяговых подстанций разнонаправлены. Такой вариант возникает, когда один из электровозов движется в режиме тяги, а другой в режиме рекуперативного торможения. При этом часть энергии рекуперации потребляется смежным электровозом, движущимся в режиме тяги, а другая перетекает по шинам тяговой подстанции в смежную МПЗ. Отличительным фактором данного режима от режима перетока мощности является различие значений токов по ФКС смежных тяговых подстанций.

Синхронные измерения на ФКС тяговых подстанций участка Шаля – Поволошная позволили оценить значения перетоков мощности и потерь электроэнергии от их протекания. Расчетное значение потерь электроэнергии, обусловленных перетоками мощности, составило 5,8 – 11,6 % от потерь в тяговой сети, что

в свою очередь составляет 0,1 % от расхода электроэнергии на тягу поездов в границах участка Подволошная – Шала.

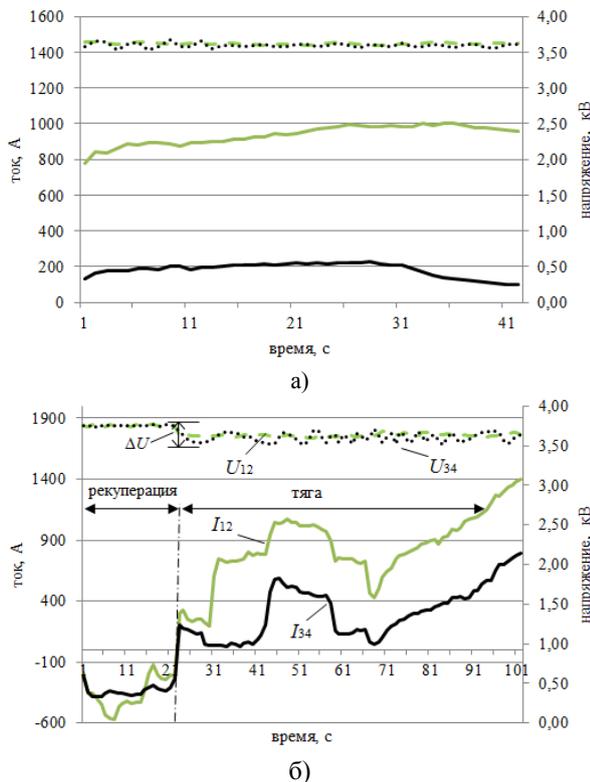


Рис. 3. Графики тока и напряжения в различных режимах работы СТЭ:
а – переток мощности; б – тяга и рекуперация

Изменение поездной обстановки на каком либо участке железной дороги в свою очередь приводит к изменениям режимов работы оборудования тяговых подстанций. Оперативное реагирование на такие изменения является актуальной задачей, цель которой – повышение эффективности работы СТЭ. Внедрение авто-

матизированных систем учета электроэнергии на тяговых подстанциях позволяет получить дополнительные возможности при разработке управленческих решений, направленных на повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения.

Литература

1. Комяков А. А. Апробация алгоритма оценки эффективности энергосберегающих устройств и технологий в системе тягового электроснабжения [Текст] / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, О. А. Гателюк // Известия Транссиба. Омск, 2014. № 4(20). С. 79 – 85.
2. Каштанов А. Л. Применение синхронных измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе при анализе эффективности систем автоведения [Текст] / А. Л. Каштанов, Д. В. Пашков // Научные исследования и их практическое применение. Состояние и пути развития: Сборник научных трудов SWorld / Одесса. Украина, 2014. №3 (36). Том 1. С. 37 – 41.
3. Черемисин В. Т. Концепция Единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов [Текст] / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, С. Ю. Ушаков // Транспорт Урала. 2013. №4 (39). С. 83 – 87.
4. Никифоров М. М. Перспективы повышения эффективности использования электроэнергии на тягу поездов при внедрении системы учета на фидерах контактной сети тяговых подстанций постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. С. 18 – 23.
5. Кващук В. А. Мониторинг напряжений в контактной сети на участках постоянного тока в условиях применения рекуперативного торможения [Текст] / В. А. Кващук, А. С. Вильгельм // Инновационное развитие железнодорожного транспорта России: Материалы всероссийской науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т. путей сообщения. Омск, 2012. С. 119 – 128.

Омский государственный университет путей сообщения

EVALUATION OF POWER FLOW IN TRACTION NETWORK DC ACCORDING TO THE AUTOMATED SYSTEM OF THE FCC ASMAA

A. L. Kashtanov, O. O. Komiakova

Introduction of the automated systems of the accounting of the electric power on traction substations allows to have additional opportunities when developing the administrative decisions directed on increase of energy efficiency of system of traction power supply. In article the method according to power overflows in a traction network of a direct current is considered, and also algorithm of data processing for the purpose of monitoring of the losses of the electric power caused by a power overflow in absence timepoints on an intersubstation zone of an electrorolling stock

Key words: traction substation, automation, efficiency, power flow

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ИНЕРЦИОННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

С.Л. Блюмин, А.В. Галкин, А.М. Казьмина

В статье представлено приближенное аналитическое решение систем дифференциальных уравнений, описывающих рабочий процесс инерционного трансформатора вращающего момента (ИТВМ), полученное методом малого параметра. Также приведено сравнение полученного решения с решениями, получаемыми приближенными численными методами

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, метод малого параметра, инерционный трансформатор вращающего момента

Математическое моделирование большинства современных технических устройств предполагает решение сложных составных систем нелинейных дифференциальных уравнений. При исследовании подобных систем может возникнуть необходимость в получении не только численного решения, но и аналитического с некоторой степенью точности. Аналитическое решение может быть использовано в задачах оптимизации параметров таких устройств. Многие методы оптимизации [1, 5, 7, 9, 11] используют для определения направления значения градиента по оптимизируемым параметрам. В случае если решение уравнений, описывающих модель, получают численными методами, определение градиента затруднено. В частности для определения производных по параметрам требуется получить численно несколько решений при разных значениях параметров, после чего вычислить производную с использованием конечно-разностных аппроксимаций [3, 4, 6]. Это связано с большими вычислительными затратами и потерей точности. Аналитическое даже приближенное решение позволяет избежать этих проблем.

Примером технического устройства, математическая модель работы которого представляет системы дифференциальных уравнений, не имеющие точного аналитического решения, является ИТВМ. Это автоматическая бесступенчатая коробка передач механического типа. Передаточное отношение от двигателя к выходному валу в таком устройстве передается автоматически. Подробно устройство ИТВМ рассмотрено [10]. Изменение передаточного отношения определяется изменением

угловой скорости выходного вала, а также зависит от нагрузки внешнего сопротивления. Рабочий процесс ИТВМ меняется циклически. На первом этапе цикла реактор и ведомый маховик движутся раздельно. Переход на второй этап происходит при достижении угловой скоростью реактора угловой скорости ведомого маховика. После чего реактор и ведомый маховик двигаются совместно. На втором этапе реактор разгоняет ведомый маховик. После разгона ведомого звена реактор начинает торможение до своей остановки. Это является третьим этапом цикла работы ИТВМ. Четвертый этап начинается, когда угловая скорость реактора становится нулевой. Этот этап называется выстоем реактора. После чего снова начинается разгон реактора.

Каждый этап цикла рабочего процесса ИТВМ описывается своей системой дифференциальных уравнений. В качестве неизвестных функций, входящих в эти уравнения, обобщенные угловые координаты поворота ведущего и ведомого вала, а также соединяющего их реактора. В уравнения также входят угловые скорости вращения и ускорения.

Модель первого этапа представлена уравнением (1)

$$\begin{cases} B_1(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + B_2(\psi)\ddot{\varphi}_{22} - B_4(\psi)(\dot{\varphi}_{21} - \dot{\varphi}_{22})^2 + \\ + B_6(\psi)\dot{\varphi}_{22}^2 = M_D; \\ B_2(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + B_3\ddot{\varphi}_{22} - B_6(\psi)\dot{\varphi}_{21}^2 = 0; \\ J_{II}\ddot{\varphi}_1 = -M_C. \end{cases} \quad (1)$$

При достижении угловой скоростью реактора угловой скорости ведомого маховика заканчивается первый этап.

Модель второго участка представлена уравнением (2)

$$\begin{cases} B_1(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + B_2(\psi)\ddot{\varphi}_{22} - B_4(\psi)(\dot{\varphi}_{21} - \dot{\varphi}_{22})^2 + \\ + B_6(\psi)\dot{\varphi}_{22}^2 = M_D; \\ B_2(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + B_5\ddot{\varphi}_{22} - B_6(\psi)\dot{\varphi}_{21}^2 = -M_C. \end{cases} \quad (2)$$

Блюмин Семен Львович – ЛГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sabl@lipetsk.ru
Галкин Александр Васильевич – ЛГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: avgalkin82@mail.ru
Казьмина Александра Михайловна – ЛГТУ, студент, e-mail: alexandrakazmina@yandex.ru

Изменением угла поворота сателлита в относительном движении на π радиан $\varphi_{21}(t_2) - \varphi_{22}(t_2) = \frac{\pi}{a}$ заканчивается второй этап.

На третьем этапе происходит торможение реактора, т.е. реактор и ведомое звено вновь движутся отдельно. Модель третьего участка представлена уравнением (1). Третий завершается, когда скорость реактора становится нулевой $\varphi_{21}(t_2) - \varphi_{22}(t_2) = \frac{\pi}{a}$. После чего происходит переход на четвертый участок.

Модель четвертого участка представлена уравнением (3)

$$\begin{cases} B_1(\psi)\ddot{\varphi}_{21} - B_4(\psi)\dot{\varphi}_{21}^2 = M_D; \\ J_{II}\ddot{\varphi}_1 = -M_C, \end{cases} \quad (3)$$

где $\varphi_i, \dot{\varphi}_i$ – обобщенные координаты и обобщенные скорости,

$$B_1(\psi) = J_{21} + nme^2 + 2nmed(1+a)\cos\psi + nJ_{I\Gamma}(1+a)^2, \\ B_2(\psi) = -anJ_{I\Gamma}(1+a) - nmaed\cos\psi,$$

$$B_3 = J_{22} + nJ_{I\Gamma}a^2, \quad B_4(\psi) = nmaed(1+a)\sin\psi,$$

$$B_5 = B_3 + J_{II}, \quad B_6(\psi) = nmaed\sin\psi,$$

$$\psi(t) = a(\varphi_{21} - \varphi_{22}),$$

a – внутреннее передаточное отношение; n – число грузовых звеньев; m – масса грузового звена; d – расстояние от оси вращения грузового звена до его центра тяжести; e – расстояние от оси вращения ИТВМ до оси вращения грузового звена; J_{21} – приведенный момент инерции ведущих элементов; J_{22} – приведенный момент инерции ведущей части реактора; J_{II} – приведенный момент инерции ведомых элементов; $J_{I\Gamma}$ – приведенный момент инерции грузового звена. Начальные условия для первого участка $\varphi_{21}(0) = \varphi_{210}$, $\dot{\varphi}_{21}(0) = \dot{\varphi}_{210}$, $\varphi_{22}(0) = \varphi_{220}$, $\dot{\varphi}_{22}(0) = \dot{\varphi}_{220}$, $\varphi_1(0) = \varphi_{10}$, $\dot{\varphi}_1(0) = \dot{\varphi}_{10}$. В качестве начальных значений для последующих участков используются конечные значения предыдущих участков, что вытекает из непрерывности процесса.

Системы (1)-(3) не имеют точного аналитического решения. Для моделирования рабочего процесса ИТВМ обычно используют численные методы решения дифференциальных уравнений. Но для задачи выбора параметров, обеспечивающих оптимальный режим работы устройства, желательно иметь аналитическое представление решения. Искать такое аналитическое приближенное представление решения можно с помощью метода малого пара-

метра [8]. Выделим в коэффициентах $B_1(\psi)$ и $B_2(\psi)$ переменные части

$$B_1(\psi) = A_1 + a_1(\psi), \quad B_2(\psi) = A_2 + a_2(\psi), \quad B_3 = A_3,$$

$$B_4(\psi) = A_4(\psi), \quad B_5 = A_5, \quad B_6(\psi) = A_6(\psi), \quad \text{где}$$

$$A_1 = J_{21} + nme^2 + nJ_{I\Gamma}(1+a)^2;$$

$$a_1(\psi) = 2nmed(1+a)\cos\psi; \quad A_2 = -anJ_{I\Gamma}(1+a);$$

$$a_2(\psi) = -nmaed\cos\psi.$$

Система (1) примет вид

$$\begin{cases} (A_1 + a_1(\psi))\ddot{\varphi}_{21} + (A_2 + a_2(\psi))\ddot{\varphi}_{22} - \\ - A_4(\psi)(\dot{\varphi}_{21} - \dot{\varphi}_{22})^2 + A_6(\psi)\dot{\varphi}_{22}^2 = M_D, \\ (A_2 + a_2(\psi))\ddot{\varphi}_{21} + A_3\ddot{\varphi}_{22} - A_6(\psi)\dot{\varphi}_{21}^2 = 0. \end{cases}$$

Малый параметр в уравнения, явно его не содержащих, можно ввести искусственно на основе априорных знаний о параметрах. Подробно вопросы ввода малого параметра обсуждаются в работе [2]. Значения величин $a_1(\psi)$, $a_2(\psi)$, $A_4(\psi)$, $A_6(\psi)$, M_D в сравнении с другими параметрами являются малыми. В этом случае ввод малого параметра преобразует систему (1) к виду

$$\begin{cases} A_1\ddot{\varphi}_{21} + A_2\ddot{\varphi}_{22} + \mu(a_1(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + a_2(\psi)\ddot{\varphi}_{22} - \\ - A_4(\psi)(\dot{\varphi}_{21} - \dot{\varphi}_{22})^2 + A_6(\psi)\dot{\varphi}_{22}^2) = \mu M_D, \\ A_2(\psi)\ddot{\varphi}_{21} + A_3\ddot{\varphi}_{22} + \mu(a_2(\psi)\ddot{\varphi}_{21} - A_6(\psi)\dot{\varphi}_{21}^2) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы (4) представляется в виде рядов (5)

$$\varphi_{21}(t) = \varphi_{21}^0(t) + \mu\varphi_{21}^1(t) + \mu\varphi_{21}^2(t) + \dots, \quad (5)$$

$$\varphi_{22}(t) = \varphi_{22}^0(t) + \mu\varphi_{22}^1(t) + \mu\varphi_{22}^2(t) + \dots$$

Для поиска порождающего решения ряды (5) подставляются в уравнения (4). Малый параметр μ приравнивается нулю

$$\begin{cases} A_1\ddot{\varphi}_{21}^0 + A_2\ddot{\varphi}_{22}^0 = 0, \\ A_2\ddot{\varphi}_{21}^0 + A_3\ddot{\varphi}_{22}^0 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Точное аналитическое представление решения уравнений (6) при заданных начальных условиях имеет вид

$$\begin{cases} \varphi_{21}^0(t) = \varphi_{210} + \dot{\varphi}_{210}t, \\ \varphi_{22}^0(t) = \varphi_{220} + \dot{\varphi}_{220}t. \end{cases} \quad (7)$$

Используя полученное порождающее решение (7), можно дальше уточнять следующие приближения. В рядах (5) оставляем два слагаемых и подставляем их в уравнения (4). Коэффициенты при малом параметре μ в уравнении (4) должны быть одинаковыми. Приравниваем их, получаем

$$\begin{cases} A_1\ddot{\varphi}_{21}^1 + A_2\ddot{\varphi}_{22}^1 - A_4(\varphi_{21}^0 - \varphi_{22}^0)^2 + A_6\dot{\varphi}_{22}^0{}^2 = M_D, \\ A_2\ddot{\varphi}_{21}^1 + A_3\ddot{\varphi}_{22}^1 - A_6\dot{\varphi}_{22}^0{}^2 = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где A_{40}, A_{60} – первые члены разложений в ряды коэффициентов A_4, A_6

$$\begin{aligned} A_{40} &= nmade(1+a)\sin a(\varphi_{21}^0 - \varphi_{22}^0), \\ A_{60} &= nmade\sin a(\varphi_{21}^0 - \varphi_{22}^0). \end{aligned} \quad (9)$$

Система уравнений (8) относительно $\dot{\varphi}_{21}^1$ и $\dot{\varphi}_{22}^1$ является линейной алгебраической. Решая ее, получаем

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_{21}^1(t) &= \frac{1}{\Delta} D_1 \sin(\varepsilon t + a_0) - \frac{A_3}{\Delta} M_{Д}, \\ \ddot{\varphi}_{22}^1(t) &= \frac{1}{\Delta} D_2 \sin(\varepsilon t + a_0) + \frac{A_2}{\Delta} M_{Д}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$D_1 = [-A_3 nmade(1+a)(\dot{\varphi}_{210} - \dot{\varphi}_{220})^2 + nmade(A_2 \dot{\varphi}_{210}^2 + A_3 \dot{\varphi}_{220}^2)],$$

$$D_2 = [A_2 nmade(1+a)(\dot{\varphi}_{210} - \dot{\varphi}_{220})^2 - nmade(A_1 \dot{\varphi}_{210}^2 + A_2 \dot{\varphi}_{220}^2)],$$

$$\Delta = A_2^2 - A_1 A_3, a_0 = a(\varphi_{210} - \varphi_{220}), \varepsilon = a(\dot{\varphi}_{210} - \dot{\varphi}_{220}).$$

Находим решение дифференциальных уравнений (10). Для первого из них общее решение

однородного $\varphi_{211}^1(t) = C_1 t + C_2$. Для первого слагаемого частное решение имеет вид

$$\varphi_{212}^1(t) = -\frac{D_1}{\Delta \varepsilon^2} \sin(\varepsilon t + a_0).$$

Для второго слагаемого частное решение имеет вид

$$\varphi_{213}^1(t) = -\frac{A_3}{2\Delta} M_{Д} t^2.$$

Получаем представление для второго члена ряда (5)

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся из начальных условий и имеют вид

$$C_1 = \frac{D_1}{\Delta \varepsilon} \cos a_0, \quad C_2 = \frac{D_1}{\Delta \varepsilon^2} \sin a_0.$$

Решение второго уравнения (9) ищется таким же образом, что и первого. Оно имеет вид

$$\varphi_{22}^1(t) = C_3 t + C_4 - \frac{D_2}{\Delta \varepsilon^2} \sin(\varepsilon t + a_0) + \frac{A_2}{2\Delta} M_{Д} t^2.$$

Постоянные интегрирования C_3 и C_4 находятся из начальных условий и имеют вид

$$C_3 = \frac{D_2}{\Delta \varepsilon} \cos a_0, \quad C_4 = \frac{D_2}{\Delta \varepsilon^2} \sin a_0.$$

Ограничиваясь двумя членами в рядах (5), имеем приближенное аналитическое решение системы (1)

$$\begin{cases} \varphi_{21}(t) = \varphi_{210} + C_2 + (\dot{\varphi}_{210} + C_1)t - \frac{D_1}{\Delta \varepsilon^2} \sin(\varepsilon t + a_0) - \\ - \frac{A_3}{2\Delta} M_{Д} t^2, \\ \varphi_{22}(t) = \varphi_{220} + C_4 + (\dot{\varphi}_{220} + C_3)t - \frac{D_2}{\Delta \varepsilon^2} \sin(\varepsilon t + a_0) + \\ + \frac{A_2}{2\Delta} M_{Д} t^2. \end{cases}$$

В системе (1) третье уравнение решается отдельно. Его точное аналитическое решение

$$\text{имеет вид } \varphi_1(t) = \varphi_{10} + \dot{\varphi}_{10} t - \frac{M_C}{2J_{\Pi}} t^2.$$

Таким же образом решаются системы уравнений (2) и (3). Решение системы (2)

$$\begin{cases} \varphi_{21}(t) = \varphi_{210} + C_2 + (\dot{\varphi}_{210} + C_1)t - \frac{D_1}{\Delta \varepsilon^2} \sin(\varepsilon t + a_0) - \\ - \frac{A_2}{2\Delta} M_C t^2 - \frac{A_5}{2\Delta} M_{Д} t^2, \\ \varphi_{22}(t) = \varphi_{220} + C_4 + (\dot{\varphi}_{220} + C_3)t - \frac{D_2}{\Delta \varepsilon^2} \sin(\varepsilon t + a_0) + \\ + \frac{A_1}{2\Delta} M_C t^2 + \frac{A_2}{2\Delta} M_{Д} t^2. \end{cases}$$

Решение системы (3)

$$\varphi_{21}(t) = \varphi_{210} + C_2 + (\dot{\varphi}_{210} + C_1)t - \frac{d_1}{\varepsilon^2} \sin(\varepsilon t + a_0) + \frac{M_{Д}}{2A_1} t^2,$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_{10} + \dot{\varphi}_{10} t - \frac{M_C}{2J_{\Pi}} t^2,$$

$$\text{где } d_1 = \frac{1}{A_1} nmade(1+a).$$

Сравним полученные методом малого параметра решения систем (1)-(3) с решением, получаемым численным интегрированием дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты. Рассматривался ИТВМ для автобуса ЛИАЗ-677М со следующими значениями параметров

$$i = 0.5, \varphi_{210} = 0, \dot{\varphi}_{210} = 334 \text{ с}^{-1}, \varphi_{220} = 0, \dot{\varphi}_{220} = 0 \text{ с}^{-1},$$

$$\varphi_{10} = 0, \dot{\varphi}_{10} = i \cdot \dot{\varphi}_{210}, J_{21} = 3.15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_{22} = 0.075 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$n = 6, m = 1 \text{ кг}, a = 1.6, e = 0.14 \text{ м}, J_{\Pi} = 19 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$d = 0.03 \text{ м}, M_{Д} = 383 \text{ Н} \cdot \text{м}, M_C = 800 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$J_{Г} = 0.00121 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

На рис. 1 и 2 представлены графики координат и графики угловых скоростей для метода малого параметра и метода Рунге-Кутты.

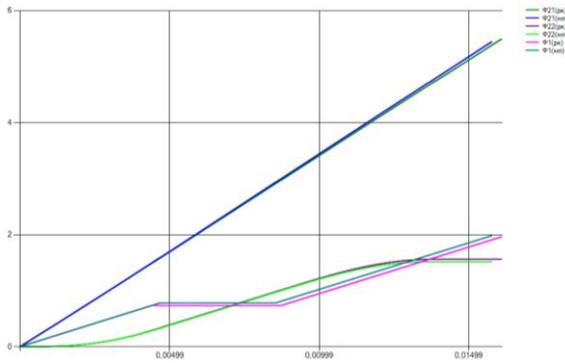


Рис.1. График координат, рассчитанных методом Рунге-Кутты и методом малого параметра для второго ИТВМ.

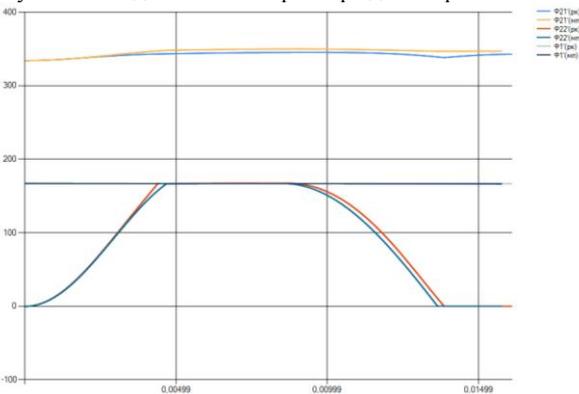


Рис.2. График угловых скоростей, рассчитанных методом Рунге-Кутты и методом малого параметра для второго ИТВМ.

В таблице приведены значения угловых скоростей реактора и ведущего звена, полученные методом малого параметра и методом Рунге-Кутты.

Рассчитанные значения угловых скоростей

t	$\phi'_{21}(ПК)$	$\phi'_{22}(ПК)$	$\phi'_{21}(МП)$	$\phi'_{22}(МП)$
0,0001	334,021	0,132	334,022	0,135
0,0002	334,067	0,538	334,065	0,534
0,0003	334,136	1,217	334,130	1,195
0,0004	334,228	2,167	334,215	2,116
...
0,0027	339,913	81,688	340,802	80,659
0,0028	340,175	86,660	341,209	85,571
0,0029	340,428	91,672	341,618	90,503
0,003	340,673	96,717	342,027	95,441
Окончание первого участка				
0,0047	343,236	166,915	347,952	166,544
0,0048	343,307	166,933	348,027	166,563
0,0049	343,377	166,951	348,100	166,58
0,005	343,447	166,969	348,173	166,600
...
0,0072	344,692	167,245	349,425	166,871

0,0073	344,732	167,251	349,462	166,877
0,0074	344,770	167,256	349,498	166,881
0,0075	344,806	167,261	349,532	166,885
Окончание второго участка				
0,0081	344,986	167,275	349,693	166,894
0,0082	345,009	167,275	349,713	166,893
0,0083	345,030	167,274	349,731	166,891
0,0084	345,050	167,273	349,747	166,888
...
0,0107	344,901	139,397	349,228	132,248
0,0108	344,850	136,498	349,168	129,066
0,0109	344,793	133,462	349,105	125,762
0,011	344,728	130,289	349,039	122,337
Окончание третьего участка				
0,014	338,580	166,802	346,622	166,573
0,0141	338,911	166,798	346,634	166,569
0,0142	339,232	166,794	346,645	166,565
0,0143	339,544	166,789	346,657	166,561
...
0,0154	342,084	166,743	346,784	166,514
0,0155	342,217	166,739	346,795	166,510
0,0156	342,331	166,735	346,807	166,506
0,0157	342,427	166,730	346,818	166,502

Полученные результаты показывают, что отклонения решений, полученных двумя способами, укладываются в 8 %. Таким образом, полученные методом малого параметра решения могут быть использованы как при моделировании рабочего процесса ИТВМ, так и в задачах оптимизации параметров. В случае решения задачи многомерной оптимизации по различным параметрам ИТВМ аналитическое решение, полученное методом малого параметра, может быть использовано для вычисления градиента, определяющего направление поиска.

Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках перечня научно-исследовательских работ базовой части государственного задания, проект № 970.

Литература

1. Барабанов, В.Ф. Рационализация выбора алгоритмов межмодульного взаимодействия компонент распределенных программных систем [Текст] / В.Ф. Барабанов, С.Ю. Белецкая, В.К. Зольников, М.Л. Лапшина, А.К. Погодаев // Системы управления и информационные технологии – 2013 - Т. 52. № 2. - С. 46-50.
2. Блехман, И.И. Синхронизация динамических систем [Текст] / И.И. Блехман - М.: Наука, 1971. – 894 с.

3. Блюмин, С.Л. Нечеткие сети Петри как окрестностные системы [Текст] / С.Л. Блюмин, А.М. Шмырин, И.А. Седых // Системы управления и информационные технологии - 2008. - Т. 33. № 3.2. - С. 233-238.

4. Блюмин, С.Л. Оптимизация параметров неявной модели инерционного трансформатора вращающего момента [Текст] / С.Л. Блюмин, А.В. Галкин // Сборник трудов Междунар. науч. конф. «Сложные системы управления и менеджмент качества». Материалы. – 2007. - Старый Оскол: ООО «ТНТ». – С.8-10.

5. Блюмин, С.Л. Суперпозиционная регрессия [Текст] / С.Л. Блюмин, А.К. Погодаев // Журнал вычислительной математики и математической физики – 1995 - Т. 35. № 10. - С. 1576.

6. Галкин, А.В. Математическое моделирование и оптимизация рабочего процесса инерционного трансформатора вращающего момента [Текст] / А.В. Галкин // Системы управления и информационные технологии - 2008. - 1.3(31) - С. 345-349.

7. Галкин, А.В. Оптимизация работы сложных динамических систем [Текст] / А.В. Галкин. // Вести выс-

ших учебных заведений Черноземья. – 2012. - №1(27). – С. 29-32.

8. Галкин, А.В. Применение метода малого параметра для решения систем уравнений, описывающих работу ИТВМ [Текст] / А.В. Галкин, С.П. Баженов // Известия ТулГУ. Спец. вып. - 2006. - С. 117-122.

9. Кудинов, Ю.И. Применение эволюционного алгоритма для идентификации нечеткой модели [Текст] / Ю.И. Кудинов, Н.А. Архипов, И.Ю. Кудинов, М.И. Полухина, А.Ю. Келина // Системы управления и информационные технологии - 2004. - Т. 14. № 2. - С. 15-18.

10. Леонов, А.И. Инерционные автоматические трансформаторы вращающего момента [Текст] / А.И. Леонов – М.: Машиностроение, 1978. - 224 с.

11. Сараев, П.В. Обучение нейронных сетей прямого распространения на основе декомпозиции вектора весов и псевдообращения [Текст] / П.В. Сараев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение – 2010 - № 1. - С. 65-74.

Липецкий государственный технический университет

CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF ANALYTICAL SOLUTIONS OF EQUATIONS, DESCRIBING THE PROCESS OF INERTIA TORQUE TRANSFORMER

S.L. Blyumin, A.V. Galkin, A.M. Kazmina

The article presents an approximate analytic solution of systems of differential equations describing the process of inertia torque transformer prepared by the small parameter. Also compares of the solution the decisions of the approximate numerical methods

Key words: differential equation, small parameter method, the inertial torque transformer

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МИКРОКАНАЛАХ КОМПАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Д.А. Коновалов, Н.Н. Кожухов, И.Г. Дроздов, Е.Г. Новиков

Настоящая работа посвящена исследованию тепломассопереноса в микроструктурах на основе нитевидных монокристаллов кремния. Предложен вариант матрицы из нитевидных кристаллов кремния, который позволяет создать развитую поверхность в теплообменниках малых габаритов. Произведен расчет процессов тепло и - массопереноса. Построены зависимости перепада давления, температуры от расхода охладителя, определены подходы для определения геометрических характеристик эффективного ребра на основе монокристаллов, исследованы критические режимы работы системы

Ключевые слова: компактный теплообменник, перепад давления, монокристалл кремния

В последние годы активное развитие таких отраслей как энергетика и электроника приводит к повышению тепловых нагрузок различных элементов оборудования, входящего в состав энергетических и электронных систем. В связи с этим, поиск новых и исследование существующих способов интенсификации теплоэнергетических процессов является актуальной задачей при создании стабильных систем отвода теплоты.

Для надежного функционирования наряду с пассивными, используют активные системы тепловой защиты с развитыми поверхностями теплообмена. Одним из высокоэффективных способов интенсификации теплопереноса является использование пористых и микроканальных теплообменных элементов исследованию которых посвящены множественные работы отечественных и зарубежных авторов [1-2].

При чрезвычайно высоких тепловых потоках, больших температурных напорах, сложной конструкции или малой доступности поверхности пористое и микроканальное охлаждение – наиболее подходящий метод тепловой защиты.

Широкий диапазон структурных, теплофизических, гидравлических, химических, оптических и других свойств пористых и микроканальных материалов, простота изготовления из них элементов конструкций, высокая интенсивность теплообмена – все это дает возможность использовать указанные теплообменные элементы в условиях действия высоких тепло-

вых нагрузок и температур, там, где другие виды охлаждения конструкций оказываются малоэффективными. Так, например, в системах тепловой защиты жидкостных ракетных двигателей, сверхзвуковых огнеструйных резаков, плазмотронов, а также блоков питания, микросхем, современных процессоров, станций базовой, спутниковой и космической связи тепловой поток в которых составляет 100 Вт/см^2 и выше [3-10].

Следует отметить, что на процесс теплопереноса оказывает непосредственное влияние не только конвективная составляющая, но и теплофизические свойства самого теплоотводящего элемента, а также термическое сопротивление между «горячей» поверхностью и охладителем. Так, при величине коэффициента внутривязного теплообмена равным $h_v = 10^9 \dots 10^{11} \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}$, эффективный коэффициент теплопроводности медной матрицы составит $160 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, а удельное термическое сопротивление между нагретой поверхностью и теплообменником составляет порядка от 10^{-3} до $10^{-2} \text{ (м} \cdot \text{К)/Вт}$, что в целом сводит на «нет» эффективность пористого охлаждения. Одним из решений данной проблемы является использование микроканальных элементов на основе монокристаллов кремния. Применение данной технологии при изготовлении устройств охлаждения позволяет снизить практически до нуля и даже исключить в принципе термическое сопротивление между подложкой и теплообменными элементами.

Фото одного из макетов базового варианта теплообменника с теплоотводящими элементами из нитевидных кристаллов кремния, выращенных на подложке полупроводника представлены на рис. 1 (а, б).

Изготовление микроканального теплообменника на основе монокристаллов кремния

Коновалов Дмитрий Альбертович – ВГТУ, канд. техн. наук, ст. преподаватель, тел. (473) 272-87-82, e-mail: dmikonov@yandex.ru

Кожухов Николай Николаевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 243-76-62, e-mail: k0zhukhov@yandex.ru

Дроздов Игорь Геннадьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 277-27-55, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

Новиков Евгений Георгиевич – ВГТУ, аспирант, тел. (473) 277-27-55, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

заключается в следующем. Нитевидные кристаллы кремния выращиваются на кремниевых монокристаллических подложках в печи с горизонтальным расположением трубчатого кварцевого реактора в открытой хлоридно-водородной системе. После разращивания кристаллов, подача тетрахлорида кремния в реакционную зону прекращается, а реактор с выращенными образцами нитевидных кристаллов охлаждается до комнатной температуры. Морфологические исследования выполняются методами сканирующей зондовой микроскопии.

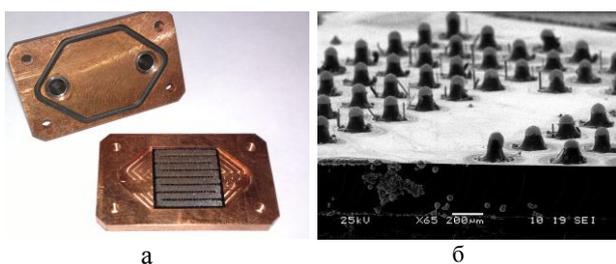


Рис. 1. Теплообменник с теплоотводящими элементами из нитевидных кристаллов кремния: а – общий вид; б – подложка монокристалла кремния с выращенными на ней теплоотводящими элементами (увеличение 65 крат)

Для исследования были разработаны и созданы теплообменные аппараты с теплоотводящими элементами (рис. 2) в виде матрицы нитевидных кристаллов кремния, которые выращены на подложке полупроводника и образуют развитую поверхность теплообмена с системой коллекторов и пронизаемых перегородок [8-10].

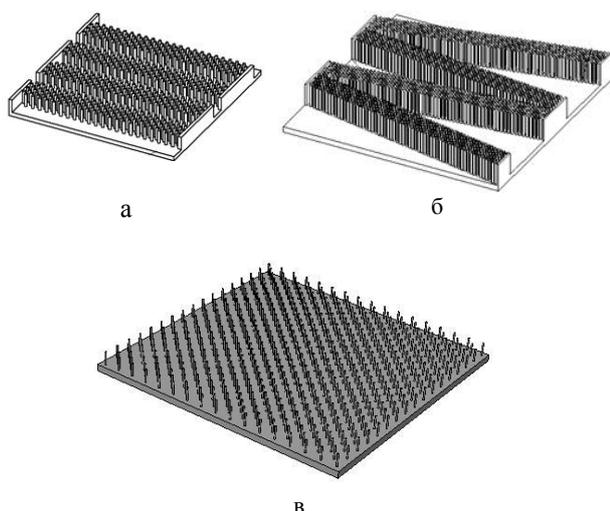


Рис. 2. Микроканальные теплоотводящие элементы на основе матрицы нитевидных монокристаллов кремния: а - с зигзагообразным прямоугольным расположением; б - с зигзагообразным клиновидным расположением; в – со сплошным расположением

В таком варианте элементы охлаждения образуют монолитную конструкцию вместе с

тепловыделяющим элементом, при этом исключается термическое сопротивление, которое присутствует в варианте при отдельном исполнении теплообменника и тепловыделяющего элемента.

В работе рассмотрен вариант матрицы, изображенный на рис. 2в. Была создана модель области течения охладителя через 1/5 часть теплоотводящего элемента (рис. 3). Данные модели были созданы в графическом пакете Siemens NX. Геометрические размеры одного «шипованного» ребра составили 20×4 мм. Высота шипов была принята 1 мм.

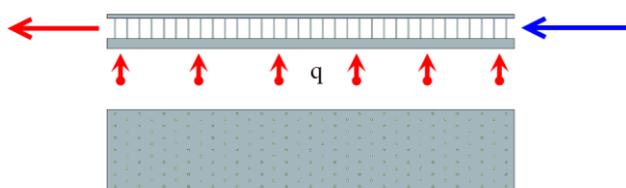


Рис. 3. Модель области течения

Тепловой поток был выбран исходя из геометрии теплонапряженного элемента (2×2 см) и составил 100 Вт/см². Исследуемый диапазон расходов охладителя составил от 3,0·10⁻⁴ кг/с до 12,0·10⁻⁴ кг/с. В пересчете на 1/5 часть элемента с нитевидными монокристаллами кремния тепловой поток составил 80 Вт.

Геометрические размеры и схема расположения монокристаллов кремния на подложке одного из ребер представлены на рис. 4.

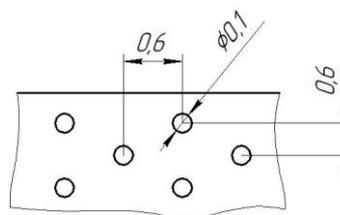


Рис. 4. Схема расположения монокристаллов кремния на подложке

Теплоотводящие элементы расположены в шахматном порядке, расстояние между центрами шипов по оси абсцисс и по оси ординат составило 600 мкм. Указанное значение шага шипов обосновано технологией изготовления микроканальных элементов на основе монокристаллов кремния.

Для проведения математического моделирования использовался специализированный расчетный комплекс Ansys Fluent v. 15, предназначенный для численного решения уравнений движения жидкости и теплообмена в интересующей расчетной области, что позволило снизить

трудоемкость и сократить длительность расчетов.

Алгоритм использования Ansys Fluent для решения поставленной задачи заключается в следующем. На первом этапе осуществляется импорт построенной 3д-модели исследуемого объекта в решатель Fluent; на втором – декомпозиция расчетной области и построение сетки, оценивается ее качество; на третьем этапе необходимо определить граничные условия, выбрать параметры расчета, свойства материалов, выбор дополнительных моделей для моделирования турбулентности; на четвертом производится решение поставленной задачи. Для ускорения получения результатов работы за расчетную область был взят элемент компактного теплообменника представленный на рис. 3. При этом учитывалось влияние подводящих и отводящих коллекторов.

Для расчетной области была сгенерирована сетка, имеющая следующие параметры: тип сетки: тетрагональная; размеры ячеек: $\min 3,793176 \cdot 10^{-17}$ м, $\max 2,098848 \cdot 10^{-11}$ м; параметр достаточности сетки (aspect ratio): $\max 20,157$.

При построении математической модели был принят ряд допущений [11-13]: рабочий агент считается вязкой несжимаемой средой (вода); течение потока трехмерное стационарное; теплофизические свойства потока принимаются постоянными и равными средним значениям в исследуемом интервале температур; на входе в расчетную область имеется полностью развитое течение с изотропной турбулентностью; теплообмен с окружающей средой отсутствует (на внешней стороне выполняется условие адиабатности).

Система уравнений Навье-Стокса для описания турбулентного движения вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости при отсутствии массовых сил представлена в векторно-тензорной форме

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \nabla \vec{V} \right). \quad (2)$$

В скалярно-тензорной форме уравнения неразрывности и изменения количества движения записываются так

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_k}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{jk}. \quad (4)$$

С учетом уравнения неразрывности (3) уравнение (4) может быть представлено в виде

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_k) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{jk}. \quad (5)$$

В уравнениях (1)-(4) используемые индексы определяют направления декартовой системы координат x_j (здесь $j=1,2,3$; $k=1,2,3$; u_k, u_j – декартовы составляющие скорости в направлении соответствующих осей; p – давление; t – время; ρ – плотность жидкости; τ_{jk} – составляющие тензора вязких напряжений; μ – коэффициент динамической (молекулярной) вязкости; \vec{V} – вектор местной скорости потока; $\vec{V} = \vec{e}_i u_i$; \vec{e}_i – единичные векторы; ∇ – оператор Гамильтона; $\partial u_k / \partial t$ – производная по времени. $\tau_{jk} = \mu \left(\partial u_j / \partial x_k + \partial u_k / \partial x_j \right)$.

Вопросы замыкания полученной системы уравнений решаются на различном уровне сложности. Простейший путь – использование эмпирической информации о характеристиках турбулентности, наиболее сложный заключается в выводе уравнений относительно рейнольдсовых напряжений.

При моделировании гидродинамики течения охладителя использовалась двухслойная модель SST. Её выбор обусловлен хорошей сходимостью для задач, где необходимо учитывать, как условия течения охладителя во входящем потоке, так и в пограничном слое вблизи шипов, обеспечивая при этом приемлемую сходимость решения [11-13]. Она относится к модели с двумя дифференциальными уравнениями, учитывающей в себе такие модели как $k-\omega$ и $k-\varepsilon$, и обеспечивает плавный переход от $k-\omega$ модели в пристеночных областях к модели $k-\varepsilon$ вдали от твердых стенок.

Система уравнений для неизоэнтальпического (с теплообменом) течения несжимаемой жидкости в декартовых прямоугольных координатах будет состоять из уравнений неразрывности (6), движения (7) и энергии (8).

$$\nabla U = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U = J - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta U, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + (U \cdot \nabla)T = a \Delta T + \frac{q_v}{\rho c_p}. \quad (8)$$

В данных уравнениях J есть результирующий вектор массовых сил, ν – кинематическая вязкость среды ($\nu = \mu / \rho$), a – коэффициент температуропроводности ($a = \lambda / \rho c_p$).

В тензорных обозначениях система (6)-(8) выглядит так

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial U_k}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial U_k}{\partial x_j} = J_k - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_k} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = a \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p}. \quad (11)$$

На входе в расчетную область задавался постоянный расход и температура 25 °С, степень начальной турбулентности 5 %, в конце 10 %. Подвод тепла был задан граничными условиями второго рода (удельный тепловой поток) на нижней поверхности расчетной модели (рис. 3). На выходе из расчетной области задаются «мягкие» граничные условия (условие продолжения решения). На остальных поверхностях задаются условия прилипания и адiabатности. В качестве охладителя выбрана вода. Расчет производился для различных режимов работы, характеризующихся различными расходами охладителя.

По результатам проведенного вычислительного эксперимента были получены картины распределения давления, скорости и температуры охладителя для различных областей и нескольких режимов работы. На рис. 8-12 представлены результаты для расхода 0,00065 кг/с.

Аналогичные результаты были получены для диапазона расходов $3 \cdot 10^{-4} - 12 \cdot 10^{-4}$ кг/с. Результаты показывают, что наблюдается симметричное течение охладителя относительно стенок, а температура шипов существенно отличается от температуры охладителя, что может приводить к локальному перегреву.

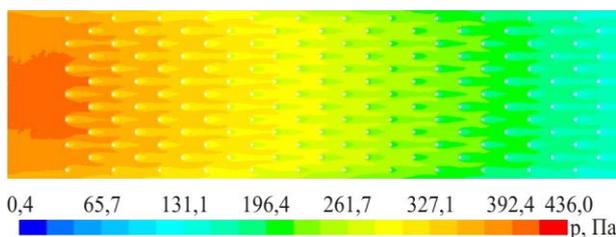


Рис. 5. Распределение давления в потоке (вид сверху)

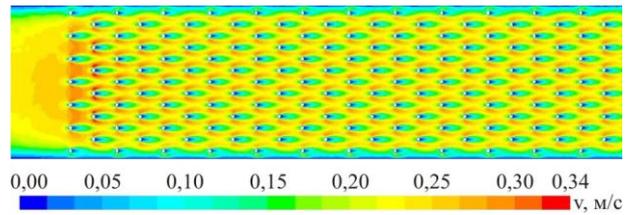


Рис. 6. Распределение скоростей в потоке (вид сверху)

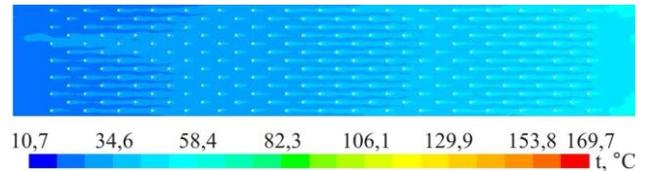


Рис. 7. Распределение температур в потоке (вид сверху)

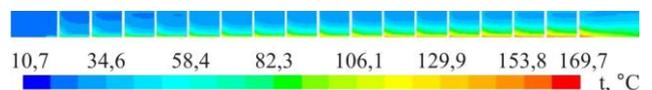


Рис. 8. Распределение температур в потоке (вид спереди)

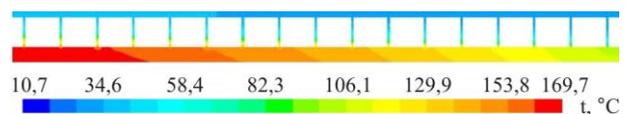


Рис. 9. Распределение температур в каркасе (вид спереди)

На рис. 10 представлены зависимости перепада давления в теплообменнике и средней температуры каркаса и потока охладителя, причем температура потока охладителя определялась по среднему значению на площади выхода охладителя, а температура каркаса по среднему значению температуры в его полном объеме.

Для оценки «работоспособности» шипов и с целью дальнейшей оптимизации высоты шипов были взяты отдельно выбранные шипы, нумерация которых представлена на рис. 11.

Распределение температур вдоль центральной оси шипа для одного из режимов работы (расход охладителя 0,00035 кг/с) представлено на рис. 12.

Проведенные исследования показали, что микроканальные теплообменники на основе нитевидных монокристаллов кремния обладают большим потенциалом теплосъема, чем их аналоги на основе пористых теплообменных элементов.

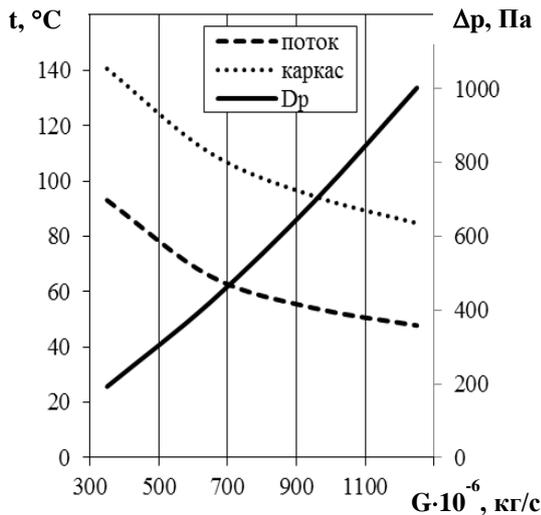


Рис. 10. График зависимостей температур и перепада давлений

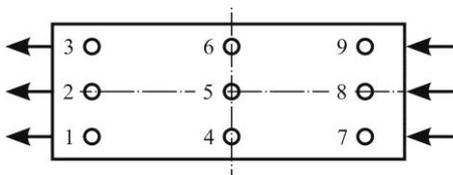


Рис. 11. Нумерация и расположение исследуемых шипов

Полученные данные показывают, что увеличение расхода охладителя не всегда ведет к эффективному охлаждению теплонапряженных поверхностей теплообменника, т.к. прогрев теплоносителя идет только в нижней его части, что создает предпосылки для разработки более эффективной конструкции теплообменника, в том числе переменного шага шипов на различных участках. Большая высота теплоотводящих элементов с увеличением расхода охладителя далеко не всегда повышает эффективность охлаждения, а зачастую приводит к дополнительным затратам на транспортировку охладителя через матрицу монокристаллов кремния.

Очевидно, что при расходах охладителя в диапазоне от $3 \cdot 10^{-4}$ до $12 \cdot 10^{-4}$ кг/с наблюдается существенное различие между температурой охладителя и шипа. В областях с высоким расходом, свыше $9 \cdot 10^{-4}$ кг/с температура шипа не превышает 100°C , что делает работу элемента охлаждения однофазной и приводит к надежному охлаждению. При этом величина гидравлического сопротивления в абсолютном выражении становится сопоставимой с сопротивлением пористых теплообменных элементов с межканальной транспирацией охладителя. Решение данной проблемы может быть устранено за счет применения теплообменных элементов,

представленных на рис. 2 (а, б) с межканальной транспирацией охладителя.

В области более низких расходов наблюдается превышение температуры шипа более чем 100°C . Очевидно, что в данном случае необходимо повышать статическое давление в системе, либо изменять геометрическое расположение шипов во избежание локального перегрева и возможного фазового перехода в областях близких к области нагрева. При этом средняя температура потока не превышает температуры фазового перехода. Распределение температуры охладителя за шипами показано на рис. 13.

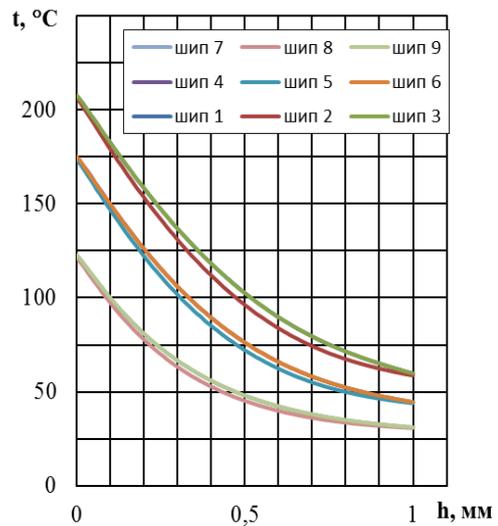


Рис. 12. Зависимость температуры шипов от высоты

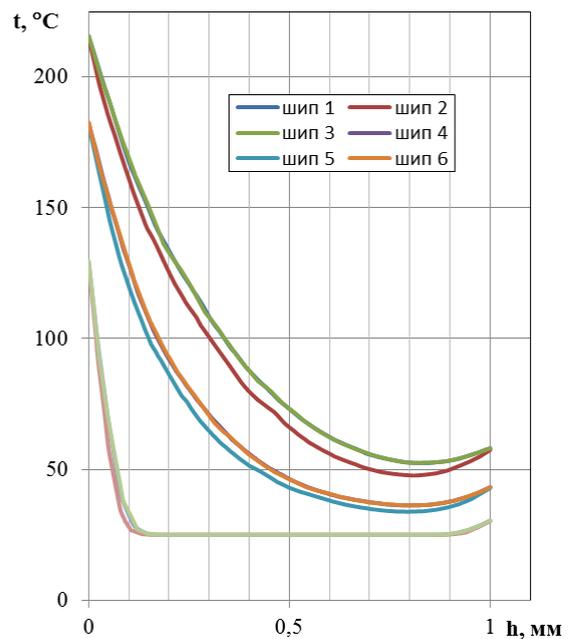


Рис. 13. Зависимость температуры охладителя за шипами по высоте канала

Из графика видно, что максимальное изменение температуры охладителя происходит при высоте канала от 0,3 мм (в начальной области течения) до 0,7 мм и более (на выходе из подложки).

Таким образом высота монокристаллического шипа свыше 0,7 мм, позволяет теплообменнику работать при относительно небольшом гидравлическом сопротивлении, при этом существенно не влияя на теплоперенос и отводимый тепловой поток. В начальном гидродинамическом участке высота шипа может быть снижена до величины от 0,2 до 0,3 мм, что повышает общую эффективность работы микроканального теплообменника.

Слишком большой подводимый тепловой поток и невысокая скорость движения охладителя могут привести к его закипанию, что недопустимо в данном случае. В случае фазового перехода в критических режимах работы конструкция должна обеспечивать надежный отвод газообразной фазы, исключая локальные перегревы. Это также создает предпосылки для дальнейшей оптимизации конструкции.

Литература

1. Дзюбенко, Б.В. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах [Текст]: монография / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов. – М.: ФГУП «ЦНИИ-АТОМИНФОРМ», 2008. – 532 с.
2. Коновалов, Д.А. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2013. – 222 с.
3. Коновалов, Д.А. Исследование нестационарного теплообмена в микроканальных теплообменных элементах на основе нитевидных кристаллов кремния [Текст]: труды шестой Российской национальной конференции по теплообмену. Секция 8. Интенсификация теплообмена [Электронный ресурс] / Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, Д.П. Шматов, И.Г. Дроздов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – Т. 3. – С. 71–72. – электрон. опт. диск.
4. Коновалов, Д.А. Моделирование процессов гидродинамики течения охладителя в наноструктурах на основе нитевидных кристаллов кремния [Текст] / Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. Т. 9. – № 3. – С. 30 – 37.
5. Шматов, Д.П. Об одном подходе к созданию модели интегрированного теплообменника [Текст] / Д.П. Шматов, И.Г. Дроздов, Д.А. Коновалов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов // Тепловые процессы в технике. – 2012. – Т. 4. – № 5. – С. 205 – 208.
6. Дроздов, И.Г. Определение перспективных направлений создания гибридных теплообменников для систем охлаждения электронной аппаратуры и оценка эффективности их работы [Текст] / И.Г. Дроздов, Д.А. Коновалов, Д.П. Шматов, Н.Н. Кожухов, С.В. Дахин // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. – Т. 8. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 151 – 154.
7. Коновалов, Д.А. Моделирование нестационарного теплообмена в пористых элементах систем тепловой защиты с использованием программного комплекса FLOWVISION [Текст] / Д.А. Коновалов, Д.П. Шматов, И.Г. Дроздов, С.В. Дахин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 4. – С. 143 – 147.
8. Пат. 51441 Российская Федерация, МПК H01L23/34. Устройство охлаждения электронных компонентов [Текст] / Дроздов И.Г., Мозговой Н.В., Шматов Д.П., Кожухов Н.Н.: заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2005121936/22; заявл. 11.07.2005; опубл. 10.02.2006, Бюл. № 4. – 4 с.
9. Пат. 58788 Российская Федерация. МПК H01L23/34. Устройство охлаждения для электронных компонентов [Текст] / Дроздов И.Г., Кожухов Н.Н., Мозговой Н.В., Коновалов Д.А., Шматов Д.П.: заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2006113838/22; заявл. 24.04.2006; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33. – 5 с.
10. Пат. 2440641 Российская Федерация. МПК H01L23/34. Устройство отвода теплоты от кристалла полупроводниковой микросхемы [Текст] / Савинков А.Ю., Дроздов И.Г., Шматов Д.П., Дахин С.В., Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Небольсин В.А.: заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «КОДОФОН». – № 2010146036/28; заявл. 10.11.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2. – 12 с.
11. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений [Текст]: учеб. пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев. – Балтийский государственный технический университет «Военмех». – Типография БГТУ. – Санкт-Петербург, 2001. – 106 с.
12. Морозов, И.И. Введение в численные методы вычислительной гидроаэродинамики [Текст]: учеб. пособие / И.И. Морозов, А.С. Лякин. – Издательство СГАУ, 2011. – 65 с.
13. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений [Текст]: учеб. пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

Воронежский государственный технический университет

MODELING OF PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER IN MICROCHANNEL AND COMPACT HEAT EXCHANGER ON THE BASIS OF WHISKERS OF SILICON

D.A. Konovalev, N.N. Kozhuhov, I.G. Drozdov, E.G. Novikov

The present work is devoted to the study of heat and mass transfer in microstructures on the basis of filamentary single crystals of silicon. A variant of the matrix of filamentary crystals of silicon that allows you to create a large surface area in the heat exchangers of small dimensions. Calculation of processes of heat and mass transfer. The dependences of the differential pressure, temperature, flow cooler, identifies approaches for determining geometric characteristics of effective edge-based single crystals, the critical modes of the system

Key words: compact heat exchanger, pressure drop, single crystal silicon