

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 665.622.43.046.6:681.513.66

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

И.В. Артюшкин, А.Е. Максимов

Институт по проектированию и исследовательским работам в нефтяной промышленности
«Гипростокнефть»
Россия, 443041, г. Самара, ул. Красноармейская, 93

Рассмотрены проблемы, возникающие при управлении процессом термохимического обезвоживания нефтяных эмульсий. Осуществлен системный анализ процесса термохимического обезвоживания как объекта управления: выделены основные управляющие параметры, определена управляемая величина. Предложена структура адаптивной системы управления с эталонной моделью, основу которой составляет искусственная нейронная сеть, обученная на экспериментальных данных и воспроизводящая их в рабочем диапазоне изменения параметров процесса термохимического обезвоживания. При этом осуществляется управление эффективностью разделения нефтяной эмульсии с учетом заданного конечного и фактического начального значений содержания воды в нефти, а также фактических значений расхода и температуры нефтяной эмульсии, поступающей на обезвоживание.

Ключевые слова: обезвоживание нефти, нейронная сеть, адаптивная система управления.

Введение

В процессе добычи практически вся нефть извлекается из скважин в виде эмульсии из нефти и пластовой воды. Эмульсией называется дисперсная система, образованная взаимонерастворимыми жидкостями.

По своей природе эмульсии являются термодинамически неустойчивыми системами. Это приводит к тому, что в состоянии покоя капли укрупняются и эмульсия постепенно расслаивается. Чем быстрее происходит этот процесс, тем менее устойчива эмульсия.

Устойчивость эмульсий существенно зависит от наличия в них природных эмульгаторов, снижающих межфазное поверхностное натяжение, а следовательно, уменьшающих суммарную свободную энергию системы, что в конечном итоге приводит к ее повышению.

*Илья Вячеславович Артюшкин, ведущий инженер, аспирант.
Алексей Евгеньевич Максимов, руководитель группы технологического отдела № 2.*

Высокое содержание воды в нефти увеличивает нагрузку на насосное оборудование при транспортировке жидкости, к тому же растворенные в пластовой воде соли вредят работе технологического оборудования, снижая срок его службы. Поэтому на ранних этапах важно отделить от нефти как можно больше воды с растворенными в ней веществами.

Автоматическое управление таким сложным процессом, как обезвоживание нефтяной эмульсии, связано с определенными трудностями, возникающими из-за недостаточной изученности процессов подготовки нефти и отсутствия адекватных моделей, которые можно использовать при разработке системы автоматического управления (САУ).

Первые разработки в области автоматического управления процессами подготовки нефти появились еще в 50-х, 60-х годах прошлого века. Вначале они были нацелены не на автоматическое управление процессами, а только на регулирование отдельных технологических параметров. В последующих работах уже решались задачи разработки структурных схем систем автоматического управления процессами подготовки нефти и их информационного обеспечения. Проводились многочисленные исследования в области статистического моделирования процессов подготовки нефти для построения их моделей как основы для разработки законов автоматического управления исследуемыми процессами [1, 2]. Однако применение статистических моделей при построении систем автоматического управления процессами подготовки нефти не привело к ожидаемому результату ввиду узкой области адекватности моделей управления и широкого диапазона изменения качественных характеристик исходного сырья.

Несмотря на имеющиеся наработки в области моделирования процессов подготовки нефти, автоматические системы управления процессом обезвоживания не получили в настоящее время широкого распространения в нефтяной промышленности.

Возникшая проблема привела к проведению ряда исследований, связанных с разработкой методов, которые позволяют расширить область адекватности математических моделей. Подбор специальных классов функций для описания процессов обеспечил расширение области применимости получаемых моделей.

Другой подход к объекту моделирования, основанный на аналитическом моделировании исследуемых процессов, начал развиваться в конце 60-х годов. Известные на сегодня аналитические модели отдельных звеньев процессов подготовки нефти [3, 4] могут служить основой для разработки законов управления при создании автоматической системы управления.

Несмотря на имеющиеся наработки в области моделирования процессов подготовки нефти, автоматические системы управления процессом обезвоживания не получили в настоящее время широкого распространения в нефтяной промышленности.

Описание технологического процесса термохимического обезвоживания

Процесс разделения водонефтяной эмульсии условно можно разделить на следующие стадии:

Стадия 1. Разрушение бронирующих оболочек капель воды. Дестабилизация эмульсии.

Стадия 2. Осаждение капель через границу раздела фаз и коалесценция.

Рассмотрим факторы, влияющие на скорость и эффективность каждой стадии процесса разделения водонефтяной эмульсии.

Эффективность разрушения бронирующих оболочек зависит от типа деэмульгатора, его дозировки, а также от гидродинамического и вязкостно-температурного режимов.

Повышение температуры при дестабилизации нефтяной эмульсии приводит к увеличению эффективности работы деэмульгатора – сокращению его расхода и уменьшению длительности срабатывания. Это обусловлено, с одной стороны, изменением активности и диффузионной поверхности деэмульгатора, с другой – ослаблением адсорбционных и механических свойств эмульгирующих веществ.

Кроме того, на эффективность процесса осаждения капель существенно влияет гидродинамический режим отстойника. Чем больше время пребывания эмульсии в аппарате, тем эффективнее процесс разделения водонефтяной эмульсии в целом, при этом на продолжительность отстоя влияют помимо вязкостно-температурных характеристик среды также и конструктивные особенности аппарата, такие как полезный объем.

На скорость осаждения капли воды также влияет увеличение ее размера. В процессе подогрева нефти, ее транспортирования и последующего отстоя капли воды могут приближаться друг к другу вследствие разности скоростей осаждения либо за счет диффузионных механизмов. При благоприятных условиях сблизившиеся капли могут коалесцировать, что приводит к укрупнению капель и увеличению скорости их оседания. Необходимым условием для коалесценции сблизившихся капель является отсутствие на них оболочек из эмульгирующих веществ, препятствующих этому процессу.

Коалесценция в процессе разделения эмульсии необходима, так как она обуславливает переход оседающих капель через границу раздела фаз. Чем слабее коалесценция, тем больше высота эмульгированного промежуточного слоя.

Таким образом, разделение водонефтяных эмульсий определяется разрушением бронирующих оболочек капель воды, осаждением взвешенных капель и их коалесценцией со сплошной фазой. На скорость этих процессов в значительной степени влияют:

- расход реагента-деэмульгатора;
- температура подогрева разделяемой эмульсии;
- продолжительность отстоя.

Регулируя перечисленные параметры, можно управлять эффективностью разделения эмульсии.



Рис. 1. Значения выходной величины

Управляемой величиной процесса разделения водонефтяной эмульсии можно считать долю отделившейся воды по завершении процесса, выраженную

в процентах от общего количества воды, содержащейся в исходной эмульсии.

Значение управляемой величины в процессе обезвоживания необходимо удерживать в зоне значений, близких к технологической уставке. На рис. 1 приведен график изменения управляемой величины во времени. Выход значения обводненности за верхний предел обозначенной зоны означает получение некондиционной нефти с большим содержанием воды. Слишком низкое значение является следствием перерасхода деэмульгатора либо чрезмерно высокой температуры нагрева эмульсии, что приводит к снижению экономической эффективности процесса.

Адаптивная система управления процессом термохимического обезвоживания

Объектом управления является установка термохимического обезвоживания нефтяной эмульсии, в состав которой входят блок дозирования реагента-деэмульгатора, блок нагрева эмульсии и дегидратор (отстойник, трехфазный сепаратор). Блок термохимического обезвоживания нефтяных эмульсий может являться как отдельной установкой, так и составной частью более крупного объекта подготовки нефти.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2.

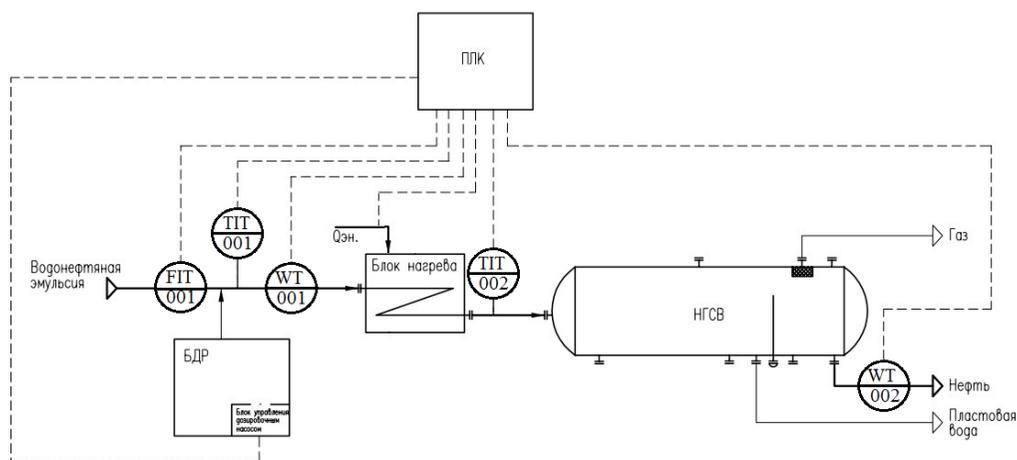


Рис. 2. Блок-схема установки обезвоживания

На данной схеме имеются обозначения: FIP001 – входной расходомер; TIT001 – датчик температуры до нагревателя; TIT002 – датчик температуры после нагревателя; WT001, WT002 – поточные влагомеры нефти; БДР – блок дозирования реагента; ПЛК – программируемый логический контроллер.

Существующие системы управления разной степени сложности, представленные на всех объектах подготовки нефти, выполняют локальные функции действующего регламента, отвечая эксплуатационным потребностям технологических линий и процессов. Как правило, это системы стабилизации отдельных технологических параметров, таких как расход, температура, уровни в технологических аппаратах и т. д.

Автоматические системы управления качественными характеристиками выпускаемой продукции, такими как остаточное содержание воды в товарной нефти, в свою очередь практически полностью отсутствуют, а их роль возложена

на обслуживающий персонал технологических установок. Однако большое количество информационных параметров, характеризующих качество ведения процессов подготовки нефти, а также сложность взаимосвязей между этими параметрами делают задачу управления, которую должен решить оператор, не только сложной, но зачастую и непосильной. Поэтому оператор решает ее только в некотором грубом приближении, что недопустимо при требуемом высоком уровне качества подготовки, высоких требованиях по энергоэффективности производства и экономии расходных материалов.

Авторами предложен альтернативный способ построения автоматизированной системы управления на основе искусственной нейронной сети (ИНС). По известным данным (заданному конечному и фактическому начальному значениям содержания воды в нефти, фактическим значениям расхода и температуры нефтяной эмульсии, поступающей на обезвоживание) ИНС выступает в роли математической модели объекта управления и автоматически генерирует управляющие сигналы для исполнительных устройств.

Система управления

На рис. 3 представлена предлагаемая система управления процессом обезвоживания нефтяной эмульсии. Это – адаптивная система управления с эталонной моделью.

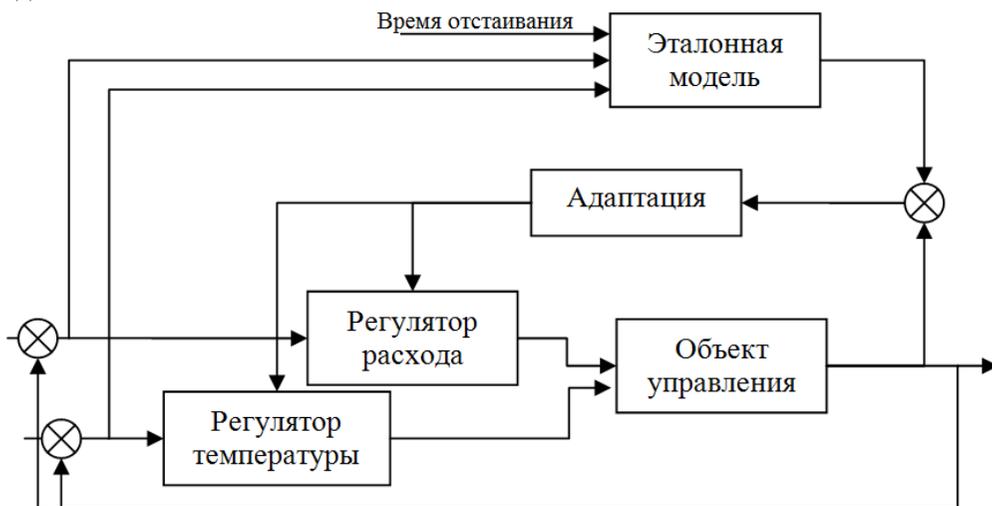


Рис. 3. Структура системы управления процессом обезвоживания

Искусственная нейронная сеть является эталонной моделью. На ее вход подается рассчитанное время отстаивания нефтяной эмульсии, а также управляющие параметры – расход деэмульгатора и температура нагрева. Регулятор производит выбор значений управляющих параметров, основываясь на реакции нейронной сети, на входные воздействия.

Рассчитанные значения управляющих величин подаются на объект управления.

Механизм адаптации производит подстройку управляющих параметров в блоках «Регулятор расхода» и «Регулятор температуры» с учетом реакции эталонной модели и аппарата термохимического обезвоживания на эти параметры, а также на основе прямых и косвенных измерений необходимых переменных с использованием датчиков или вычислительных блоков.

Эталонная модель включена параллельно объекту управления. Значения управляющих воздействий корректируются с помощью программно-логического механизма адаптации. Регулятор пропорционально увеличивает или уменьшает значения управляющих параметров, основываясь на разнице выходов нейронной сети и объекта управления в установившемся режиме.

Механизм адаптации производит подстройку управляющих параметров с учетом реакции эталонной модели на эти параметры, а также на основе прямых и косвенных измерений необходимых переменных с использованием датчиков или вычислительных блоков.

Выходные значения блоков «Регулятор расхода» и «Регулятор температуры» являются управляющими воздействиями для аппарата термохимического обезвоживания.

Выходным значением объекта управления является измеренная на выходе из аппарата обводненность нефти.

Искусственная нейронная сеть как ключевой элемент системы управления

Нейронные сети можно рассматривать как современные вычислительные системы, преобразующие информацию по образу процессов, происходящих в мозге человека. Обработываемая информация имеет численный характер, что позволяет использовать нейронную сеть в качестве модели объекта с нечеткими или неопределенными характеристиками.

При разработке системы управления процессом разделения водонефтяной эмульсии авторами была построена искусственная нейронная сеть, которая была обучена на экспериментальных данных, взятых из отчета о НИР по разработке технико-технологических рекомендаций по подготовке нефти Среднеботуобинского НГКМ, выполненного специалистами промышленного отдела АО «Гипровостокнефть».

В отчете представлено определение технологических параметров процесса предварительного обезвоживания искусственных эмульсий, таких как тип и удельный расход реагента-деэмульгатора, продолжительность и температура отстаивания эмульсии, обработанной реагентом. В качестве основных исходных данных были использованы результаты теплотехнического обезвоживания нефти Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения I ступени при температуре 10; 20; 40 °С, времени отстаивания 15; 30; 60; 90; 120 минут и расходе реагента 0; 21; 42; 63; 84 г/т нефти для наиболее эффективного по результатам исследований деэмульгатора – Диссольван-5592. В сводной таблице представлены результаты теплотехнического обезвоживания нефти Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (составлена на основе таблиц из отчета о НИР).

Для воспроизведения экспериментальных данных была построена нейронная сеть из двух слоев нейронов: скрытого и выходного. Также имеются входные нейроны, число которых соответствует числу входных параметров – 3 (расход деэмульгатора, температура нагрева и время отстаивания). Число нейронов в выходном слое соответствует числу выходов – 1.

Нейронная сеть была обучена на расширенном диапазоне экспериментальных данных методом Левенберга – Марквардта.

**Сводная таблица результатов теплохимического обезвоживания нефти
Среднеботуобинского НГКМ**

Реагент	Температура, °С	Расход реагента		Отделилось воды, %, за время отстаивания мин					Содержание воды в нефти, % об., после отстаивания, мин				
		г/м ³ жидк.	г/т нефти	15	30	60	90	120	15	30	60	90	120
Диссольван - 5592	10	15	21	2,7	5,4	13,6	16,3	19,0	18,7	18,2	17,0	16,6	16,1
		30	42	5,6	11,2	28,2	33,9	36,7	18,4	17,4	14,6	13,6	13,1
		60	84	11,4	40,0	60,6	74,3	80,0	17,1	12,5	7,0	5,8	4,5
	20	15	21	5,3	21,0	26,3	31,6	36,8	19,1	16,5	15,6	14,6	13,6
		30	42	12,9	36,1	43,8	49,0	54,1	17,9	13,8	12,3	11,3	10,3
		60	84	15,5	67,0	79,9	82,2	85,1	17,4	7,6	4,8	3,6	3,0
	40	15	21	10,4	23,4	39,1	44,3	49,5	18,1	15,9	13,1	12,1	11,1
		30	42	36,8	52,6	65,8	71,7	73,7	13,5	10,5	7,8	6,7	6,1
		60	84	67,7	88,5	88,5	9,1	91,1	7,4	4,0	2,8	2,3	2,3
Холостой		0	0	0	0	0	0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	

Результат, генерируемый обученной ИНС, представлен на рис. 4, где Q – расход деэмульгатора, t – температура эмульсии.

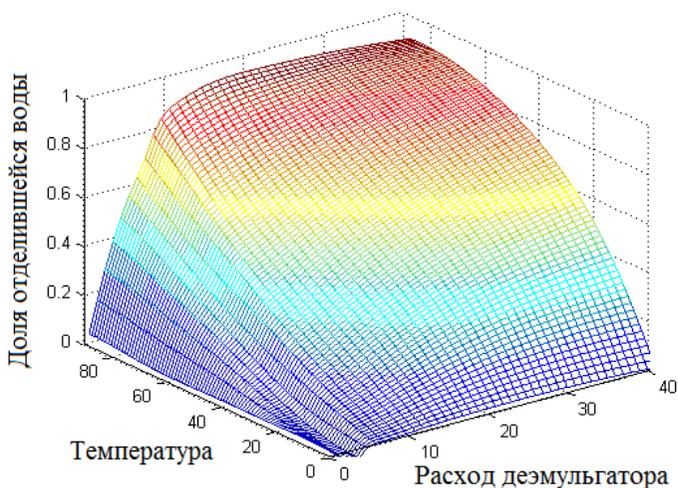


Рис. 4. Выход нейронной сети для времени отстаивания 120 мин

На рис. 5, а, б, в для сравнения представлены графики экспериментальных данных (сплошная линия) и результата моделирования нейросети (линия с точками).

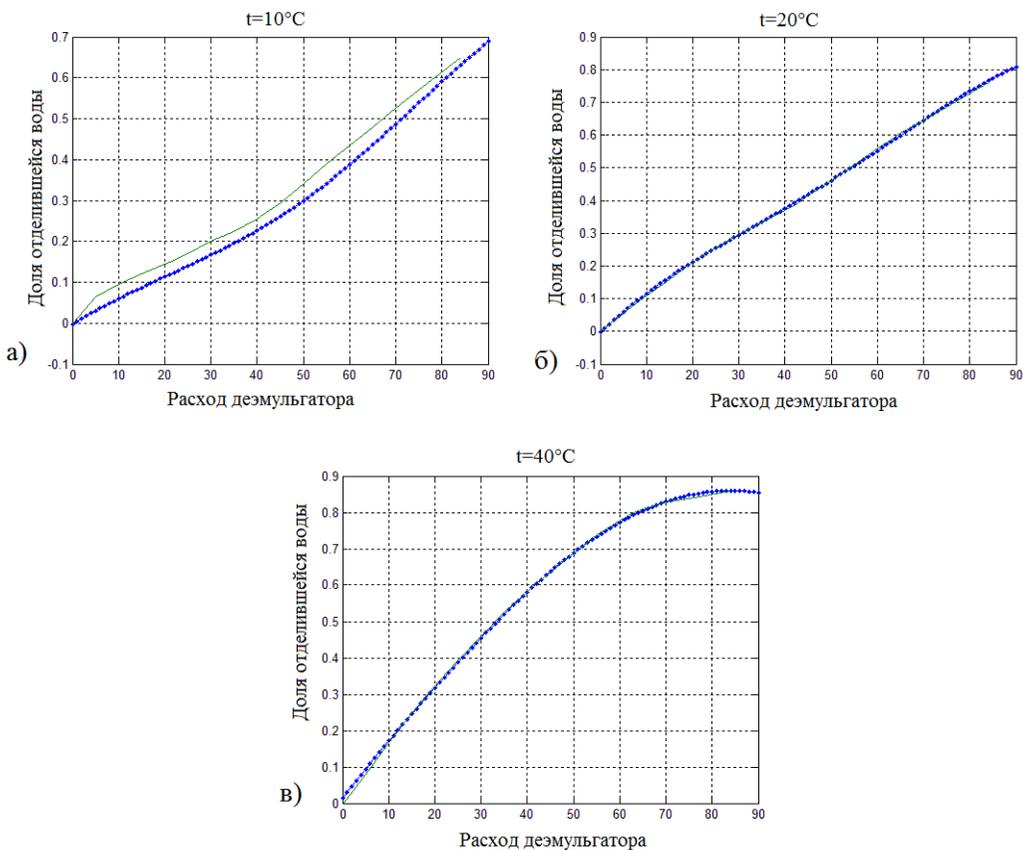


Рис. 5. Доля отделившейся воды при времени отстаивания 60 минут:
a – при температуре 10 °С; *б* – при температуре 20 °С; *в* – при температуре 40 °С

Заключение

Предложен подход к построению автоматической системы управления процессом термохимического обезвоживания, заключающийся в использовании в качестве генератора управляющих сигналов для исполнительных устройств искусственной нейронной сети. При этом осуществляется управление эффективностью разделения нефтяной эмульсии с учетом заданного конечного и фактического начального значений содержания воды в нефти, а также фактических значений расхода и температуры нефтяной эмульсии, поступающей на обезвоживание.

Разработанная структура системы управления может интегрироваться в действующие промышленные установки, а также проектироваться для новых установок подготовки нефти. При этом разработка эталонной модели должна проводиться индивидуально для каждого объекта с учетом характерных свойств и состава обрабатываемой в нем нефтяной эмульсии.

Представленная АСУ может являться составной частью общей автоматической системы управления объектом подготовки нефти в целом, включающим помимо ступени обезвоживания ступень электрообессоливания, а также все сопутствующие процессы (дегазация, нагрев, перекачка и т. д). Основой подобной общей системы управления будут являться одна или несколько искусственных нейронных сетей. При этом оперативное управление такими сложными произ-

водственными объектами, как установки подготовки нефти, будет значительно упрощено. Такая система является одним из шагов на пути внедрения безлюдных технологий производства, так как позволяет создать автономную установку, не требующую постоянного присутствия оперативного персонала для ее обслуживания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Путохин В.С. Математическое моделирование технологического процесса обезвоживания нефти на промыслах // Нефть и газ. – М.: МИНХ и ГП, 1977. – С. 37-42.
2. Путохин В.С. Статистическая модель управления процессом подготовки нефти // РНТС ВНИИОЭНГ. Сер. Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – 1979. – № 9. – С. 9-12.
3. Абдуллаев Ф.М. и др. Синтез алгоритмов оптимального управления процессами комплексной подготовки нефти // РНТС ВНИИОЭНГ. Сер. Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – 1981. – № 1. – С. 14-16.
4. Рзаев А.Г. Оптимизация технологических процессов термохимического обезвоживания и обессоливания нефти // РНТС ВНИИОЭНГ. Сер. Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – 1981. – № 3. – С. 14-16.
5. Аксенов С.В., Новосельцев В.Б. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии). – Томск, 2006.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – М.: Наука, 1975.
7. Голицын В.М. Контроль процессов подготовки нефти на промыслах. – М.: Недра, 1972.
8. Джонс М. Тим. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. – Москва, 2004.
9. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. 2-е изд. – Киев, 1988.
10. Каплан Роберт. Основные концепции нейронных сетей. – М., 2001.
11. Логинов В.И. Обезвоживание и обессоливание нефтей. – М.: Химия, 1979.
12. Позднышев Г.Н. Стабилизация и разрушение нефтяных эмульсий. – М.: Недра, 1982.
13. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М., 2006.
14. Тронов В.П. Промысловая подготовка нефти. – Казань, 2000.
15. Хайкин Саймон. Нейронные сети. 2-е изд. – М., 2006.
16. Черек А.М. Разработка метода оптимального автоматического управления процессами обезвоживания и обессоливания: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1984.

Статья поступила в редакцию 2017 г.

AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM DESIGN FOR THERMO-CHEMICAL DEHYDRATION BASED ON NEURAL NETWORK

I.V. Artyushkin, A.E. Maximov

Institute for design and research in oil industry «Giprovostokneft»
93, Krasnoarmeiskaya st., Samara, 443041, Russian Federation

Problems appearing while controlling thermochemical oil emulsion dehydration are shown. System analysis of thermochemical oil emulsion dehydration process is made. Main control and controllable parameters are found. Adaptive control system with master model is introduced. Artificial neural network trained on experimental data and reproducing it in operating range of the thermochemical oil emulsion dehydration process is proposed. Effectiveness of oil emulsion separation with considering both preassigned and actual initial oil humidity is controlled. Also actual flow rate and oil emulsion temperature for dehydration are controlled.

Keywords: oil dehydration, neural network, adaptive control system.

*Ilya V. Artyushkin, Lead Engenner.
Aleksey E. Maximov, Team Leader.*

УДК 004.932.2

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АЛГОРИТМ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ В СЕРИИ СНИМКОВ

И.А. Бурцев

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева
Россия, 152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Приведен алгоритм подтверждения местоположения найденных характерных фрагментов в серии снимков, использующий расстояния между искомыми объектами, который позволяет однозначно определить текущее местоположение видеокамеры. Представлена его математическая модель. Рассмотрены основные программные модули, реализующие алгоритм подтверждения, и информационные связи между ними. Представлены результаты экспериментальных исследований разработанного алгоритма в составе системы поиска нескольких характерных фрагментов. Отмечена эффективность использования алгоритма, основанная на экспериментальных временных и вероятностных оценках, в системе поиска характерных фрагментов земной поверхности. Сделан вывод о целесообразности использования разработанного модуля подтверждения местоположения в системах компьютерного зрения.

Ключевые слова: идентификация, поиск фрагментов, система поиска фрагментов, серия снимков.

Исследование быстро изменяющегося информационного поля, представленного в виде серии снимков или видеопотока земной поверхности, требует выполнения ряда трудоемких задач. Одной из основных задач является определение местоположения видеокамеры относительно характерных фрагментов (объектов), расположенных на расстоянии, превышающем размер одного снимка. Вычисленное местоположение камеры позволит отследить маршрут ее перемещения до текущего характерного объекта, скорректировать существующий или задать новый маршрут движения по информационному полю. В случае правильной привязки к нескольким объектам появляется возможность предсказать появление объектов, расположенных дальше по маршруту.

Быстрое изменение формы, цвета, освещенности объектов, связанное с погодными условиями, временами года, текущим расположением естественных источников света, обуславливает динамичность информационного поля и не позволяет использовать системы, требующие длительного времени обучения и предварительной обработки искомым объектов.

Для решения поставленной задачи необходимо провести поиск одновременно нескольких характерных объектов, представленных в виде набора фрагментов малого размера, в серии полученных изображений с указанием их расположения относительно камеры. При известных абсолютных координатах минимум трех фрагментов (в системе глобальных координат информационного поля) можно вычислить текущее положение видеокамеры относительно любой точки исследуемого пространства.

При поиске одиночного объекта широко используется корреляционный ме-

Иван Александрович Бурцев, аспирант.

тод. Он сводится к вычислению взаимной корреляции искомого объекта и полученного изображения. При значениях, превышающих минимальный порог корреляции, сравниваемые изображения считаются идентичными [1]. Корреляционный метод обладает высоким быстродействием и позволяет найти и идентифицировать искомый фрагмент по одному кадру, однако под действием затрудняющих распознавание факторов (погодные условия, изменение освещенности, шум) вероятность правильной идентификации невелика [4].

Не менее распространенным методом поиска является использование искусственных нейронных сетей (ИНС). Данный метод основывается на извлечении существенных свойств изображений и построении на их основе сигнатур (обучение ИНС), используемых в дальнейшем для сравнения пар изображений [9]. Достаточно подробные описания построения и применения ИНС в системах цифровой обработки изображений представлены в работах [10–12].

Несмотря на широкий спектр возможностей и высокие показатели точностных характеристик, известные методы полностью не решают поставленную задачу. Идентификация объектов по одному снимку не позволяет однозначно и точно определить местоположения камеры на изменяющемся информационном поле. Для решения поставленной задачи предлагается использовать ограниченную серию снимков.

Суть предлагаемого алгоритма заключается в том, что на каждом кадре в серии снимков каким-либо методом [5–7, 13] определяются предположительные координаты всех искомых фрагментов относительно верхнего левого угла первого снимка серии (рис. 1, точка O , абсолютные координаты, A). Далее вычисляются расстояния между всеми найденными фрагментами. Фрагменты, расстояния между которыми совпадают с заранее известными и абсолютные координаты которых не изменяются на протяжении наибольшего числа снимков, следующих друг за другом, считаются идентифицированными, остальные фрагменты считаются отсутствующими в текущей серии снимков.

Рассмотрим расположение четырех характерных фрагментов 1, 2, 3, 4 на серии из N снимков с взаимными расстояниями между ними $S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{23}, S_{24}, S_{34}$ (см. рис. 1). Снимки обозначены пунктирными линиями. На снимке характерные фрагменты могут отсутствовать (снимок III), присутствовать по отдельности (снимок IV) и вместе (снимок I). Снимки в серии могут пересекаться, как снимки I, II и III, IV, и не пересекаться, как снимки II, III. Фрагменты могут присутствовать в текущей серии снимков (фрагменты 1, 2, 3) и отсутствовать (фрагмент 4).

Основной алгоритм включает в себя четыре блока обработки информации (рис. 2).

При вычислении элементов матрицы A абсолютных координат относительные координаты фрагмента x_0 и y_0 на текущем снимке суммируются с перемещением предыдущих снимков r_x и r_y (см. рис. 1). Т. е. вычисляются координаты каждого найденного фрагмента относительно верхнего левого угла кадра 1 в системе координат X, Y (см. рис. 1) для всей последовательности снимков $j = 1, 2, \dots, N$:

$$x_j = x_{0j} + \sum_{m=1}^j r_{xm}, y_j = y_{0j} + \sum_{m=1}^j r_{ym}.$$

Вычислив абсолютные координаты для всех выделенных характерных фраг-

ментов в серии снимков, получаем последовательности N пар координат, из которых формируется матрица A :

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nN} \end{pmatrix},$$

где $A_{ij} = A(x_{ij}, y_{ij})$; i – порядковый номер искомого фрагмента; n – количество искоемых фрагментов.

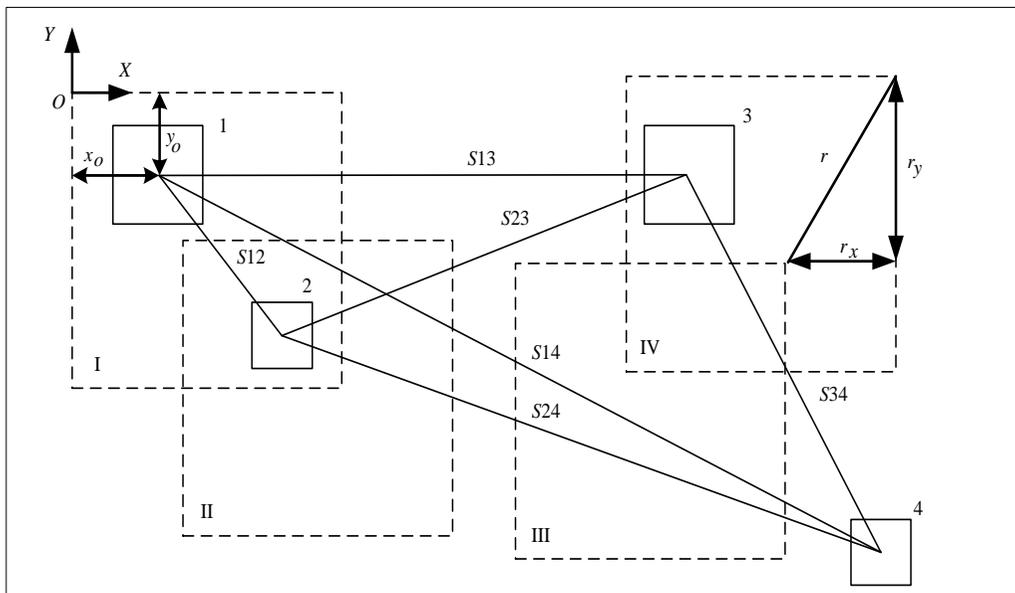


Рис. 1. Пример расположения искоемых фрагментов в серии снимков

Так как возможно наличие ложно обнаруженных фрагментов, что связано с несовершенством методов поиска, то необходимо провести анализ изменения координат найденного фрагмента между текущим и предыдущим кадрами. Отсутствие изменения абсолютных координат в последовательности снимков указывает на присутствие характерного фрагмента i в одной и той же точке пространства $A(x_{ij}, y_{ij})$.

Для определения наиболее вероятных координат фрагментов формируется множество $B_i = \{(C_{iu}, p_{iu})\}$, состоящее из элементов, представляющих собой пару из координат фрагмента C_{iu} и ее вероятности p_{iu} , определяющей количество снимков, на которых фрагмент обнаруживался в точке C_{iu} , где u – порядковый номер пары. Элементы множества B_i вычисляются следующим образом: $C_{i1} = A_{i1}$; $p_{i1} = 1$. Для всех $j = 2, 3, \dots, N$ и $u = 1, 2, \dots, z$, где z – количество пар в множестве B_i на шаге j . Если евклидова норма $\|A_{ij} - C_{iu}\| \geq e$, где e – макси-

мально возможное расстояние между изображениями одного и того же искомого фрагмента на разных снимках, то

$$C_{iz+1} = A_{ij};$$

$$p_{iz+1} = 1,$$

иначе выбирается элемент множества B_i (существующая пара), для которого $\|A_{ij} - C_{iu}\|$ минимальна, и пересчитываются его компоненты C_{iu} и p_{iu} :

$$C_{iu} = \frac{C_{iu} + A_{ij}}{2};$$

$$p_{iu} = p_{iu} + 1.$$

Таким образом, вероятность p_{iu} увеличивается при обнаружении фрагмента в одной и той же точке информационного поля.

Для уменьшения количества вычислений из множества B_i исключаются элементы с малой вероятностью p_{iu} , а оставшиеся элементы упорядочиваются по убыванию по второму параметру p_{iu} и укладываются в строку i матрицы C :

$$\langle (C_{i1}, p_{i1}), (C_{i2}, p_{i2}), \dots, (C_{is}, p_{is}) \rangle,$$

где $p_{i1} \geq p_{i2} \geq \dots \geq p_{is}$.

Упорядоченные координаты фрагментов укладываются в строку i матрицы C :

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1s} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{ns} \end{pmatrix},$$

где s – количество столбцов матрицы C , выбираемое вблизи значения $N/10$. Сильное уменьшение данного параметра ведет к увеличению вероятности не идентифицировать ни одного фрагмента, а увеличение – к возможности неправильной идентификации всех фрагментов

На следующем этапе обработки (см. рис. 2) происходит вычисление расстояний между найденными объектами, которые сравниваются с известными эталонными расстояниями S (см. рис. 1).

Для удобства обработки известные расстояния между фрагментами записываются в матрицу S в следующем виде:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & 0 & S_{23} & \dots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & 0 & \dots & S_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

где $S_{il} = S_{li}$.

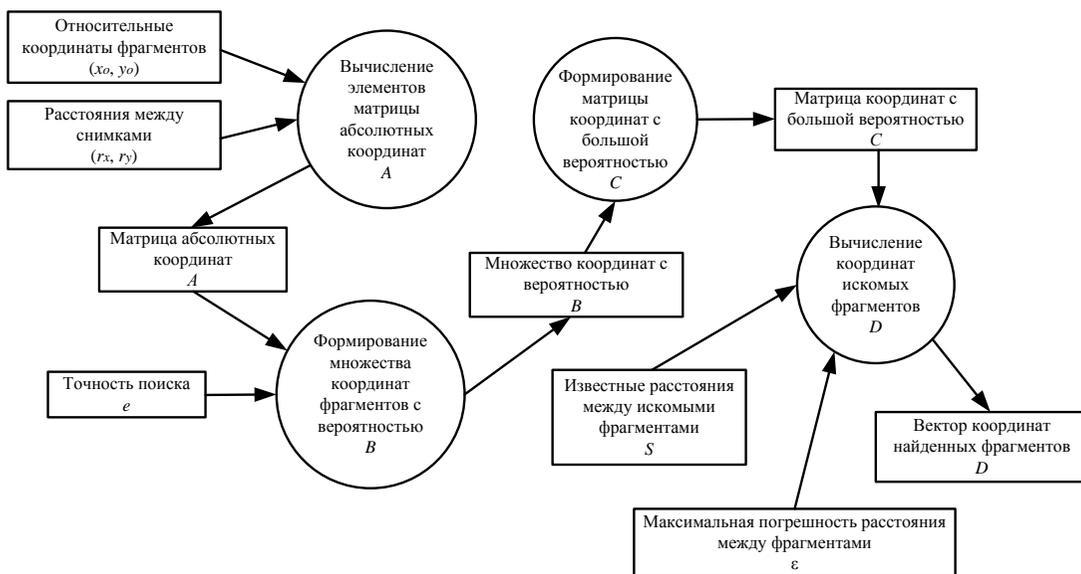


Рис. 2. Схема подтверждения координат искомых фрагментов

Для идентификации найденных фрагментов вычисляются все возможные расстояния между ними и сравниваются с известными. Если $\|C_{ik} - C_{lp}\| - S_{il} \leq \varepsilon$ хотя бы для одной пары k, p , где i, l ($i \neq l$) – номер строки, а k, p – номер столбца матрицы C , то идентификация останавливается и координатами фрагмента i считаются C_{ik} , а фрагмента $l - C_{lp}$, иначе принимается решение об отсутствии фрагментов в текущей серии снимков.

Идентифицированные координаты записываются в вектор-столбец D , в котором номер строки соответствует порядковому номеру искомого фрагмента:

$$D = \begin{pmatrix} (x_1, y_1) \\ (x_2, y_2) \\ \vdots \\ (x_n, y_n) \end{pmatrix}.$$

Если искомый фрагмент отсутствует в текущей серии снимков, то вместо его координат записывается пара чисел, означающая отсутствие фрагмента.

Предложенный алгоритм подтверждения местоположения протестирован в составе системы поиска [2] фрагментов в серии снимков земной поверхности, на которых присутствовали как искомые фрагменты, так и не входящие в набор тестовых изображений объекты. Расстояние между текущим и следующим снимками серии не превышало 0,3 их размеров, размеры фрагментов h и снимков H составили 64×64 и 512×512 пикселей соответственно, количество снимков в серии равно 30, количество серий – 10.

Оценка вероятности правильной идентификации производилась в параметрах чувствительности Se – отношение количества правильно идентифицированных фрагментов к общему числу фрагментов, присутствующих в серии снимков, и специфичности Sp – отношение количества правильно идентифицированных

фрагментов к общему числу идентифицированных фрагментов (правильных и ложных) [3].

При поиске двух характерных фрагментов быстрыми корреляционными методами независимо друг от друга, без учета расстояний между ними чувствительность и специфичность равны 0,65 и 0,17 соответственно [8]. Таким образом, при независимом поиске количество правильно идентифицированных фрагментов мало. Кроме того, с увеличением количества искомых фрагментов число одновременно правильно идентифицированных фрагментов снижается, а ложных – растет.

Разработанный алгоритм, учитывающий расстояния между характерными фрагментами, позволил увеличить показатель специфичности до 0,68 при нахождении обоих искомых фрагментов на одном снимке и до 0,88 при расстоянии между фрагментами больше размера снимка.

Экспериментальные исследования показали, что при увеличении количества идентифицированных фрагментов в одной серии снимков увеличивается чувствительность и специфичность при условии, что количество идентифицированных фрагментов на одном снимке не более одного. При идентификации большого количества фрагментов на одном снимке, т. е. когда расстояние между искомыми фрагментами достаточно мало, показатели чувствительности и специфичности, представленные в таблице, снижаются. Это связано с тем, что алгоритм поиска выделяет наиболее похожие на фрагменты области на каждом из снимков, и при малом расстоянии между искомыми фрагментами выше вероятность того, что расстояние между двумя ложно найденными фрагментами совпадет с известным, и происходит идентификация по одному снимку (без учета остальных кадров серии).

Влияние количества искомых фрагментов на чувствительность и специфичность

№ п/п	Количество фрагментов	Расстояния между фрагментами, S_{ij}			
		$S_{ij} > H$		$h < S_{ij} < H$	
		Se	Sp	Se	Sp
1	2	0,9	0,88	0,71	0,68
2	3	0,98	0,97	0,8	0,77
3	4	0,99	0,99	0,85	0,81
4	5	0,99	0,99	0,85	0,83
5	6	0,99	0,99	0,88	0,87

На рис. 3 представлен график зависимости времени поиска местоположения камеры от количества искомых фрагментов. Время нормировано относительно времени идентификации двух характерных фрагментов.

Полученная зависимость имеет вид функции \sqrt{g} , скорость изменения которой с увеличением g уменьшается. Таким образом, увеличение количества искомых фрагментов в малой степени влияет на время поиска. Также было выяснено, что одновременное нахождение нескольких характерных фрагментов на одном снимке не влияет на время их идентификации.



Рис. 3. Зависимость времени поиска от количества искомых фрагментов

Результаты

Применение разработанного алгоритма в системе поиска повысило показатель специфичности относительно системы, не использующей серию снимков, более чем в 2 раза, а при большом количестве идентифицированных фрагментов, расстояния между которыми больше размера снимка, показатели чувствительности и специфичности близки к 1. Предложенный алгоритм соответствует современному уровню развития науки по качеству распознавания [14, 15], в том числе показателям методов, использующих ИНС [13]. Кроме того, алгоритм подтверждения делает возможным однозначное определения местоположения видеокамеры, что повышает скорость адаптации системы анализа информационных полей к быстро изменяющимся областям поиска. Еще одним преимуществом является возможность выполнения разработанного алгоритма параллельно с получением очередной серии снимков, что уменьшает общее время местоопределения.

Разработанный алгоритм может применяться в системах ориентации на местности по снимкам земной поверхности беспилотных летательных аппаратов, в системах компьютерного зрения при движении роботизированной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баклицкий В.К.* Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. – Тверь: Книжный клуб, 2009. – 360 с.
2. *Бурцев И.А., Вишняков В.А.* Эффективность двухуровневой системы поиска фрагмента на изображении // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2014. – № 4. – С. 100–104.
3. *Кольцов П.П.* Эмпирический подход к оценке алгоритмов выделения границ // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2011. – № 2. – С. 50–57.
4. *Вишняков В.А., Червинский А.А.* Технологии обработки сигналов при поиске местоположения фрагмента на динамическом видеоизображении // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2013. – № 1. – С. 103–110.
5. *Бурцев И.А.* Современные методы поиска объектов на изображении // Сборник статей международной-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития технических наук». – Уфа, 2015. – С. 31–34.
6. Методы индексирования и поиска изображений и видеоданных на основании визуального содержания / Байгарова Н.С., Бухштаб Ю.А., Горный А.А., Евтеева Н.Н., Лялин В.Ю., Монастырский А.В., Стрелков А.Ю. // Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – 2000. – № 7.
7. *Olson C.F., Huttenlocher D.* Automated target recognition by matching oriented edge pixels // IEEE

- Trans. on Image processing. 1997. V. 6. No 1. P. 103–113.
8. *Бурцев И.А.* Результаты исследования системы поиска характерных фрагментов в серии изображений // Журнал по материалам XXVII международной конференции «Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения», Москва, 23 июня 2016 г.: в 4 ч. Ч. 2. – М: Международный образовательный центр, 2016. – С. 17–18.
 9. *Варламов А.Д., Шаранов Р.В.* Поиск визуально подобных изображений на основе машинного обучения // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: XIV Всероссийская научная конференция RCDL'2012. Переславль-Залесский, 15–18 октября 2012 г.: труды конференции. – Переславль-Залесский: Университет города Переславля, 2012. – С. 152–159.
 10. *LeCun Y., Bengio Y.* Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series, in Arbib M. A. (Eds), The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, MIT Press, 1995.
 11. *Matsugu M., Mori K., Mitary Y., Kaneda Y.* Subject independent facial expression recognition with robust face detection using a convolutional neural network. – Neural Networks 16, 2003.
 12. *Юдашкин А.А.* Бифуркации стационарных решений в синергетической нейронной сети и управление распознаванием образов // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 11.
 13. *Юдашкин А.А.* Распознавание растровых изображений с помощью динамической нейронной сети, заданной в пространстве комплексных чисел // Известия Самарского научного центра РАН. – 2003. – № 1.
 14. *Zhang D.* Content-base shape retrieval using different shape descriptors: a comparative study. In IEEE International Conference on Multimedia and Expo. – 2001. – P. 289–293.
 15. *Десятников И.Е., Утробин В.А.* Алгоритмы поиска изображений в базах видеоданных // Компьютерная оптика. – 2011. – № 3. – С. 416–422.

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2016 г.

PROBABILISTIC ALGORITHM FOR THE VERIFICATION OF THE LOCATION OF FRAGMENTS WITH CONSIDERATION OF RELATIVE PLACEMENT IN A SERIES OF IMAGES

I.A. Burtsev

P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University
53, Pushkin st., Rybinsk, Yaroslavl oblast, 152934, Russian Federation

The paper considers algorithm of the verification for a specific fragments in a series of images, using the distance between required fragments, and its mathematical model. Algorithm allow uniquely identify the current location of the camera. The main software modules and information links between them are considered. The experimental research results of developed algorithm as a part of the specific fragments search system are introduced. The effectiveness of the use of the developed algorithm in the search system based on experimental time and probability is estimated. The conclusion on use expediency of the developed unit in the computer vision systems is made.

Keywords: *identification, search fragments, dynamic information field, series of images.*

УДК 681.3

МЕТОД «АКТОР-КРИТИК» В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

М.Л. Паткин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрена процедура синтеза устойчивого к стохастическим изменениям среды нейросетевого агента, реализующего управление в задачах преследования для мобильной киберфизической системы в виде машины Дубинса. Синтез нейросетевого агента предложено производить посредством обучения нейронной сети методом «Актор-Критик». Построена компьютерная модель обучения и тестирования агента для различных параметров машины Дубинса и среды. Произведено сравнение предлагаемого метода синтеза нейросетевого агента с методом синтеза с помощью «жадного алгоритма» для различных вариантов поведения жертвы и для различных параметров машины Дубинса. Произведена визуализация выходов нейронной сети Актора, что показало, как нейронная сеть работает и реагирует на окружающую среду.

Ключевые слова: обучение с подкреплением, метод «Актор-Критик», машина Дубинса, искусственные нейронные сети, киберфизическая система.

Искусственные нейронные сети (ИНС) за последнее время показывают выдающуюся эффективность в различных сферах науки и техники. Ученые разрабатывают все новые методы для улучшения качества и ускорения обучения ИНС. Конечно, такая революция в области ИНС не могла пройти мимо такого большого раздела, как обучение с подкреплением (reinforcement learning – RL).

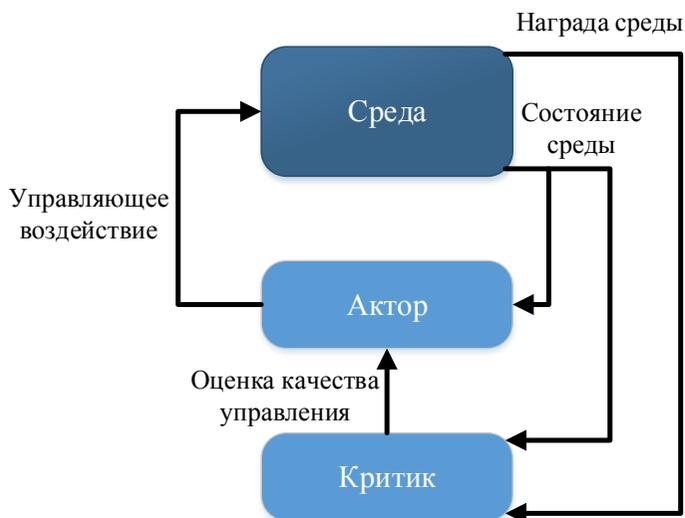


Рис. 1. Диаграмма работы АК-метода

Использование методов RL в задачах управления мобильными кибернетическими системами дает существенное преимущество по сравнению с эвристическими методами. При изменении свойств среды достаточно будет обучить агента заново или переобучить предварительно обученного агента для приспособления к новым условиям. В эвристических же методах изменение среды может фатально повлиять на качество работы мобильного агента.

Метод «Актор-Критик» (АК) [1] является одним из самых распространенных методов в RL. Главная идея метода представляет собой структурную независимость блока, отвечающего за выработку управляющего воздействия – Актора от блока, который служит для оценки успешности действий Актора (рис. 1). Метод «Актор-Критик» сочетает в себе преимущества методов, основанных на оценке функции полезности (Value-based) и градиентных (Policy-based) методов [2].

Описание агента и процесса обучения

Основой агента являются модули Актор и Критик, представляющие собой глубокие ИНН, конфигурации которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Структуры Актора и Критика

	<i>Структура Актора</i>	<i>Структура Критика</i>
1	Полносвязный слой: 256 нейрона	Полносвязный слой: 256 нейрона
2	Регуляризация Дропаут: 20 %	Регуляризация Дропаут: 20 %
3	Активационный слой: РЕЛУ [3]	Активационный слой: РЕЛУ
4	Полносвязный слой: 256 нейрона	Полносвязный слой: 256 нейрона
5	Регуляризация Дропаут: 20 %	Регуляризация Дропаут: 20 %
6	Активационный слой: РЕЛУ	Активационный слой: РЕЛУ
7	Полносвязный слой: 3 нейрона	Полносвязный слой: 1 нейрона

В табл. 1 Дропаут (Dropout) 20 % – слой, в котором обнуляется 20 % выходных значений. РЕЛУ (ReLU – Rectified Linear Unit) – слой нелинейности по функции $f(x) = \max(0, x)$.

Обучение агента делится на две большие части – обучение Критика и Актора. Схематично обучение представлено на рис. 2.

Обучение Критика

Задачей Критика является аппроксимация Q -функции – функции полезности управления. ИНН Критика обучается с использованием градиентов, которые происходят от TD-ошибки (ошибки временной разности между оценками полезности на предыдущем и текущем шаге [4])

$$y_i = r_i + \gamma Q'(s_{i+1}, \mu'(s_{i+1} | \theta^{\mu'}) | \theta^{Q'}), \quad (1)$$

где r – награда среды;
 s – состояние среды;
 γ – весовой коэффициент;
 μ' – функция Актора;

θ^μ – веса нейронной сети Актора;

θ^Q – веса нейронной сети Критика.

Веса нейронной сети критика обучаются с помощью градиентов, полученных от среднеквадратичной функции потерь L :

$$L = \frac{1}{N} \sum_i \left(y_i - Q(s_i, a_i | \theta^Q) \right)^2, \quad (2)$$

где N – размер минибатча данных. Как видно из (2), L является среднеквадратичной функцией потерь.

Обучение Актора

Обучение Актора осуществляется по методу DDPG (deep deterministic policy gradient – глубокий градиентный метод). В [4] показано, что функцию DPG можно свести к SPG (stochastic policy gradient – стохастический градиентный метод). Функция DPG рассчитывается согласно алгоритму

$$\nabla_{Q^\mu} \mu \approx E_{\mu'} \left[\nabla_a Q(s, a | \theta^Q) \Big|_{s=s_t, a=\mu(s_t)} \nabla_{Q^\mu} \mu(s | \theta^\mu) \Big|_{s=s_t} \right], \quad (3)$$

где $E_{\mu'}$ – отношение между наградой, полученной Актором, и предсказанной наградой.

В качестве алгоритма оптимизации и в случае Актора, и в случае Критика был выбран RMSProp [5, 6].

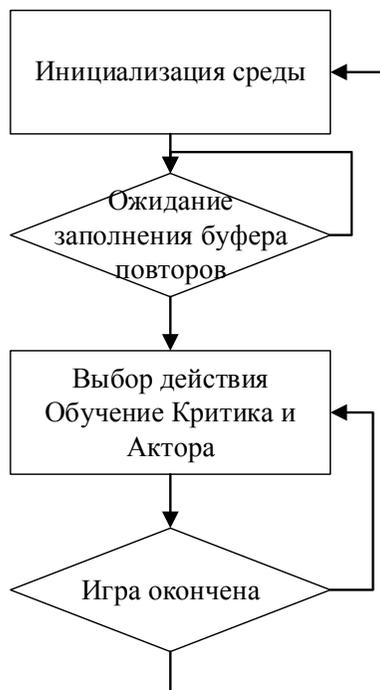


Рис. 2. Процесс обучения агента

Обучение проводилось на компьютере с процессором Intel i7 3,4 GHz и видеокарте Nvidia Titan Black и заняло 30 минут.

Описание среды

Среда (рис. 3), в которой действует мобильный агент (охотник), представляет собой поле шириной 1000 пикселей и высотой 700. В среде находятся жертва, препятствия и мобильный агент. Задача агента – приблизиться к жертве на расстояние не менее 0,5 м (что соответствует 100 пикселям на экране) относительно центра жертвы, при этом не задев препятствия и границы среды. У мобильного агента есть 4 сенсора: 3 сонара и компас, который показывает относительный угол между осью движения мобильного агента и центром жертвы. Управление мобильным агентом осуществляется посредством выбора одной из трех команд: налево, прямо, направо. Управление скоростью робота не предполагается в данной задаче. Инициализация робота происходит всегда в одной позиции, но угол каждый раз выбирается случайно. Также среда поддерживает режим, при котором жертва может двигаться случайно по плоскости.

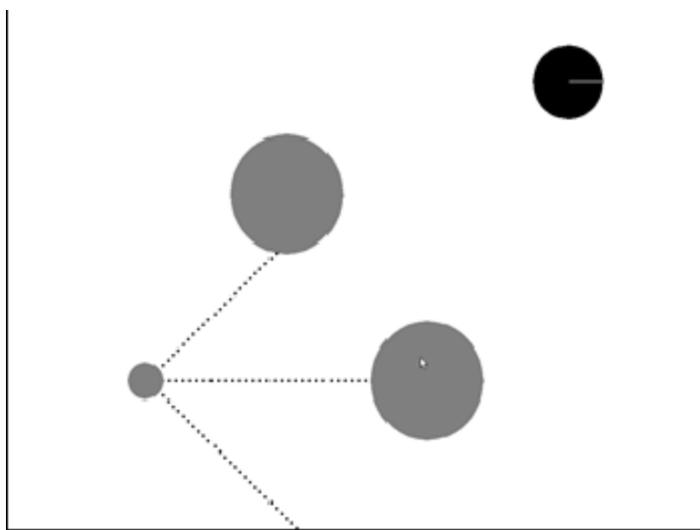


Рис. 3. Визуализация среды, объекты: маленький серый – хищник, черные точки – линии действия сонаров, два больших серых – препятствия, черный – жертва

Тестирование

Тестирование проводилось для случаев со статической жертвой, со стохастической жертвой, при котором жертва выбирала направление движения случайно, а также с убегающей жертвой, при котором жертва всегда убегает под углом $\pm 90^\circ$ относительно приближающегося хищника. И в случае со стохастической жертвой, и с убегающей скоростью жертвы равна скорости хищника. Также тестирование проводилось для случаев с минимальными радиусами разворота машины Дубинса, равными 50 и 100 пикселей. Качество агента сравнивалось с «жадным алгоритмом», его схема работы:

– если угол до цели меньше -3° , то выбираем поворот налево. Если угол больше 3° , то выбираем поворот направо. В остальных случаях выбираем движение прямо;

– если расстояние до препятствия по данным левого сонара меньше 100 пикселей, то выбираем поворот направо. Если расстояние до препятствия по данным правого и центрального сенсора меньше 100 пикселей, то выбираем поворот налево.

Качество агента оценивалось как доля успешных запусков, то есть случаев, когда машина поймала жертву. В табл. 2 приведены результаты тестирования «жадного алгоритма» и модели «Актор-Критик», которое проводилось на 1000 повторений. На рис. 4 представлены примеры траекторий для «жадного алгоритма» и метода «Актор-Критик».

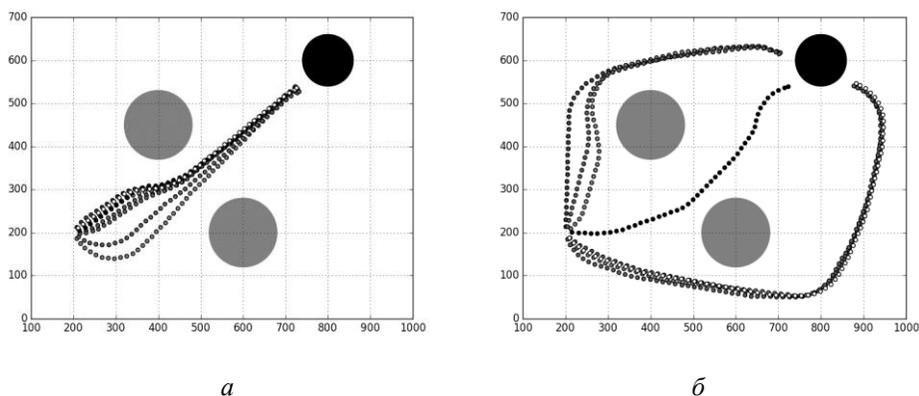


Рис. 4. Статическая жертва: *а* – траектория при «жадном алгоритме»; *б* – траектория при методе «Актор-Критик»

Таблица 2

Доли успешных запусков для «жадного алгоритма» и модели «Актор-Критик»

Показатель	«Жадный алгоритм»	«Актор-Критик»
Статическая цель/Минимальный радиус 50	0,372	0,788
Статическая цель/Минимальный радиус 100	0,832	0,911
Динамическая цель/Минимальный радиус 50	0,399	0,735
Динамическая цель/Минимальный радиус 100	0,757	0,762
Убегающая цель/Минимальный радиус 50	0,370	0,766
Убегающая цель/Минимальный радиус 100	0,697	0,758

Как видно из табл. 2, во всех случаях метод «Актор-Критик» выигрывает, либо совсем немного, либо существенно.

Сравнение с животным миром

В статье [7] было высказано предположение, что в животном мире за направление и за близость к жертве у хищника в мозге отвечают разные группы нейронов.

Была проверена гипотеза о том, что Актор после обучения имеет нечто похожее на то, что происходит в головном мозге хищника, а именно разные акти-

вазии групп нейронов в разных ситуациях. Однако после проведения ряда экспериментов и визуализации выходов второго полносвязного слоя было замечено (рис. 5, где 256 нейронов этого слоя изображены в виде квадрата 16 на 16), что яркие активации (значения выходов, значительно отличающихся от нуля) происходят в моменты, когда агенту нужно принять решение об изменении направления, чтобы не врезаться в препятствие (рис. 5, *в*, *г*). В моменты, когда агенту не нужно принимать срочного решения о смене траектории движения, ярких активаций немного (рис. 5, *а*, *б*).

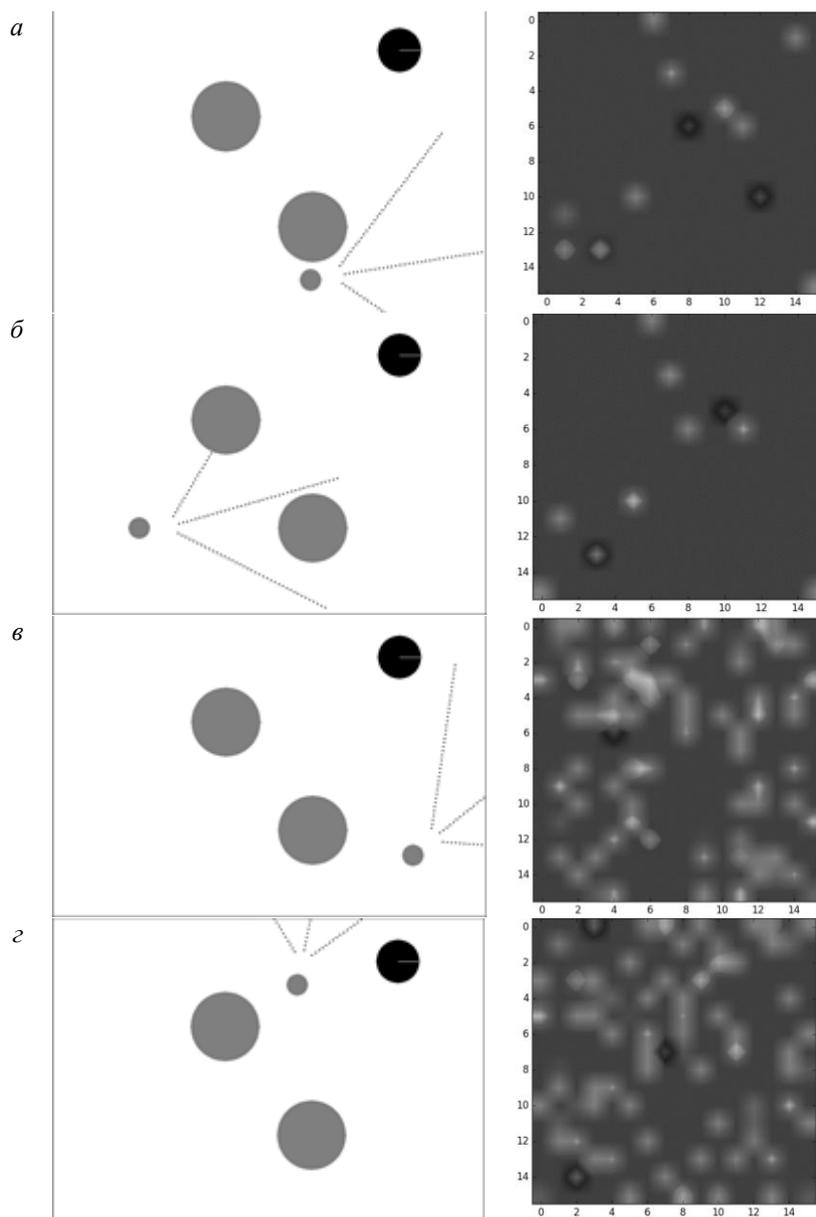


Рис. 5. Карта активации выхода 2-го полносвязного слоя Актора

Выводы

Были созданы среда и модель машины Дубинса, для которой синтезирован и обучен агент на основе метода «Актор-Критик», который показал лучшие результаты в задачах преследования в сравнении с агентом на основе «жадного алгоритма». Следующим этапом готовится модификация среды и алгоритма для мультиагентного случая.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Konda V.R., Tsitsiklis J.N.* Actor-Critic Algorithms // NIPS. – 1999. – Т. 13. – С. 1008-1014.
2. *Bhatnagar S. et al.* Natural actor-critic algorithms // Automatica. – 2009. – Т. 45. – №. 11.
3. *Nair V., Hinton G.E.* Rectified linear units improve restricted boltzmann machines // Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10). – 2010. – С. 807-814.
4. *Silver D. et al.* Deterministic Policy Gradient Algorithms // Proceedings of The 31st International Conference on Machine Learning. – 2014. – С. 387-395. *Witten I. H. et al.* Data Mining: Practical machine learning tools and techniques. – Morgan Kaufmann, 2016.
5. *Tieleman T., Hinton G.* Lecture 6.5-RMSProp, COURSERА: Neural networks for machine learning // University of Toronto, Tech. Rep. – 2012.
6. *Sarel A. et al.* Vectorial representation of spatial goals in the hippocampus of bats // Science. – 2017. – Т. 355. – № 6321. – С. 176-180.

Статья поступила в редакцию 15 января 2017 г.

ACTOR-CRITIC METHOD IN MOBILE CYBER-PHYSICAL SYSTEMS CONTROL PROBLEM

M.L. Patkin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

A synthesis procedure of neural network agent that is resistant to stochastic environmental changes that implement the control in the problem of prosecution for mobile cyber-physical system as Dubins Car is considered. Synthesis of neural network agent asked to produce by training “Actor-Critic” neural network. A computer model of training and testing agent for various parameters Dubins car and environment is developed. A comparison between the suggested method and the greedy algorithm for the various cases of victims’ parameters as well as for the cases with different Dubins Car parameters is made. The visualization of outputs of the Actor neural network that showed how a responsive neural network on the environment is performed.

Keywords: *reinforcement learning, Actor-Critic method, Dubins car, artificial neural networks, cyber-physical system.*

УДК 519.872

ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ НЕНАДЕЖНОЙ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ РЕЗЕРВИРОВАННОЙ ОДНОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С ПОТЕРЯМИ¹

А.И. Песчанский

Севастопольский государственный университет
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 г

E-mail: peschansky_sntu@mail.ru

Объектом исследования является однолинейная ненадежная система обслуживания с потерями, в которой во время обслуживания заявки может нарушиться работоспособность канала. Сразу же начинается восстановление его работоспособности, а обслуживание заявки продолжается за счет временного резерва, который является случайной величиной. Если временного резерва оказывается достаточно для завершения обслуживания заявки, то следующая заявка принимается на обслуживание только после завершения восстановления канала. Если резерва времени недостаточно, то заявка теряется и больше на дообслуживание не возвращается, а следующая заявка принимается на обслуживание только после восстановления работоспособности канала. Если во время обслуживания заявки за счет временного резерва канал успевает восстановиться, то он продолжает обслуживание заявки. Определяются стационарные характеристики системы в предположении, что все случайные величины, описывающие ее функционирование, имеют общий вид.

Ключевые слова: *ненадежная однолинейная система обслуживания, полумарковский процесс с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний, стационарное распределение вложенной цепи Маркова, финальные вероятности состояний, среднее стационарное время пребывания в состояниях.*

Для практических приложений большую важность представляет исследование систем, в которых обслуживающие каналы выходят из строя, требуя восстановления. Анализ методов обеспечения и повышения надежности таких систем, а также обзор литературы по этой тематике можно найти, например, в [1–4]. В частности, одним из важных способов повышения надежности является временное резервирование, когда для устранения отказа система имеет определенный запас времени, в течение которого она может выполнять заданные функции. Примером такого резервирования является использование источника бесперебойного питания для снабжения энергией соединенного с ним персонального компьютера в случае сбоя питания. Отказ системы наступает в тот момент, когда полностью исчерпывается резерв времени и к этому моменту не удастся восстановить ее работоспособность. Определение стационарных характеристик описанной системы усложняется, если предполагать, что все случайные величины, которые описывают систему обслуживания, имеют общие законы распределения. Для решения этой проблемы в данной работе привлекается аппарат теории полумарковских процессов с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний [5].

Алексей Иванович Песчанский (д.т.н.), профессор кафедры «Высшая математика».

Постановка задачи. Рассмотрим одноканальную систему обслуживания $GI/G/1/0$ с потерями и ненадежным обслуживающим каналом. Время между поступлениями заявок – случайная величина (СВ) β с функцией распределения $G(t) = P\{\beta \leq t\}$. Длительность времени обслуживания заявки СВ α с функцией распределения $F(t) = P\{\alpha \leq t\}$. Во время обслуживания заявки может нарушиться работоспособность канала. Длительность времени от начала обслуживания заявки до момента нарушения работоспособности канала – СВ γ с функцией распределения $\Phi(t) = P\{\gamma \leq t\}$. Сразу же после отказа канала начинается его восстановление, которое длится случайное время σ с функцией распределения $\Psi(t) = P\{\sigma \leq t\}$. Обслуживание заявки после потери работоспособности канала продолжается за счет временного резерва, который представляет собой СВ ξ с функцией распределения $R(t) = P\{\xi \leq t\}$. В случае расходования временного резерва заявка, находящаяся на обслуживании, теряется и больше на дообслуживание не возвращается. Система находится в отказе и приступает к обслуживанию заявок только после восстановления канала. Если во время обслуживания заявки за счет временного резерва канал успевает восстановиться, то он продолжает обслуживание заявки. В случае повторного отказа канала обслуживание заявки опять продолжается за счет временного резерва, который пополняется до случайной величины ξ с той же функцией распределения $R(t)$. Таким образом, за счет неоднократного использования временного резерва может быть завершено обслуживание принятой каналом заявки в случае его отказов.

Предполагается, что случайные величины α , β , γ , σ и ξ независимы, имеют плотности распределения вероятностей $f(t)$, $g(t)$, $\varphi(t)$, $\psi(t)$, $r(t)$, конечные математические ожидания $E\alpha$, $E\beta$, $E\gamma$, $E\sigma$, $E\xi$ и дисперсии соответственно.

Цель работы – найти финальные вероятности пребывания системы в состоянии обслуживания заявки каналом, обслуживания за счет временного резерва, восстановления канала и ожидания заявки, а также определить средние стационарные времена пребывания системы в этих состояниях.

Построение полумарковской модели. Рассматриваемая система обслуживания может находиться в следующих физических состояниях: 11 – канал обслуживает заявку; 12 – заявка обслуживается за счет резерва; 2 – резерв исчерпан, заявка потеряна, канал восстанавливается; 02 – обслуживание заявки закончено за счет резерва, канал восстанавливается; 0 – система работоспособна и ожидает поступления заявки. Расширим фазовое пространство физических состояний до пространства полумарковских состояний добавлением непрерывных координат, которые обеспечат марковское свойство в моменты изменения физических состояний. В результате фазовое пространство системы будет иметь вид

$$E = \{11, 11z, 12z, 02ux, 2ux, 0x\}.$$

Коды состояний системы расшифровываются следующим образом:

11 – начинает обслуживаться заявка, поступившая в свободную систему;

12z – произошел отказ канала и начинается его восстановление, обслуживание заявки продолжается за счет временного резерва; с начала обслуживания заявки прошло время z ;

11z – канал восстановился и продолжает обслуживание заявки, с момента начала обслуживания которой прошло время z ;

02ux – обслуживание заявки закончено за счет резерва; до конца восстановления канала осталось время u , а до момента поступления ближайшей заявки – время x ;

2ux – резерв времени исчерпан, заявка потеряна, до конца восстановления основного канала осталось время u , а до момента поступления ближайшей заявки – время x ;

0x – канал закончил обслуживание заявки либо восстановился; до момента поступления ближайшей заявки осталось время x .

Для описания функционирования системы используем процесс марковского восстановления $\{S_n, \theta_n, n \geq 0\}$, где $S_n \in E$ – полумарковские состояния системы, θ_n – время пребывания системы в различных состояниях, и соответствующий ему полумарковский процесс $S(t)$ [5]. Для задания процесса марковского восстановления необходимо определить переходные вероятности вложенной цепи Маркова $\{S_n, n \geq 0\}$ и функции распределения случайных величин θ_n .

Времена пребывания системы в состояниях определяются выражениями

$$\theta_{11} = \alpha \wedge \gamma, \theta_{02ux} = \theta_{2ux} = u, \theta_{0x} = x, \theta_{11z} = \gamma \wedge [\alpha - z]_+,$$

$$\theta_{12z} = \sigma \wedge \xi \wedge [\alpha - z]_+,$$

где \wedge – знак минимума, а $[\alpha - z]_+$ – время, оставшееся до конца обслуживания заявки, с плотностью распределения вероятностей $\frac{f(x+z)}{\bar{F}(z)}$.

Граф переходов и временная диаграмма функционирования системы представлены на рис. 1 и рис .2 соответственно.

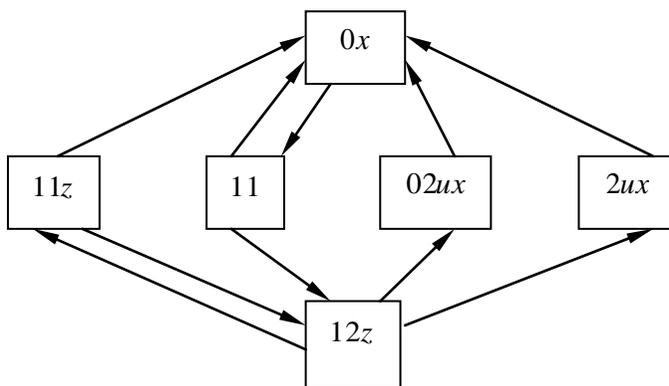


Рис. 1. Граф переходов системы

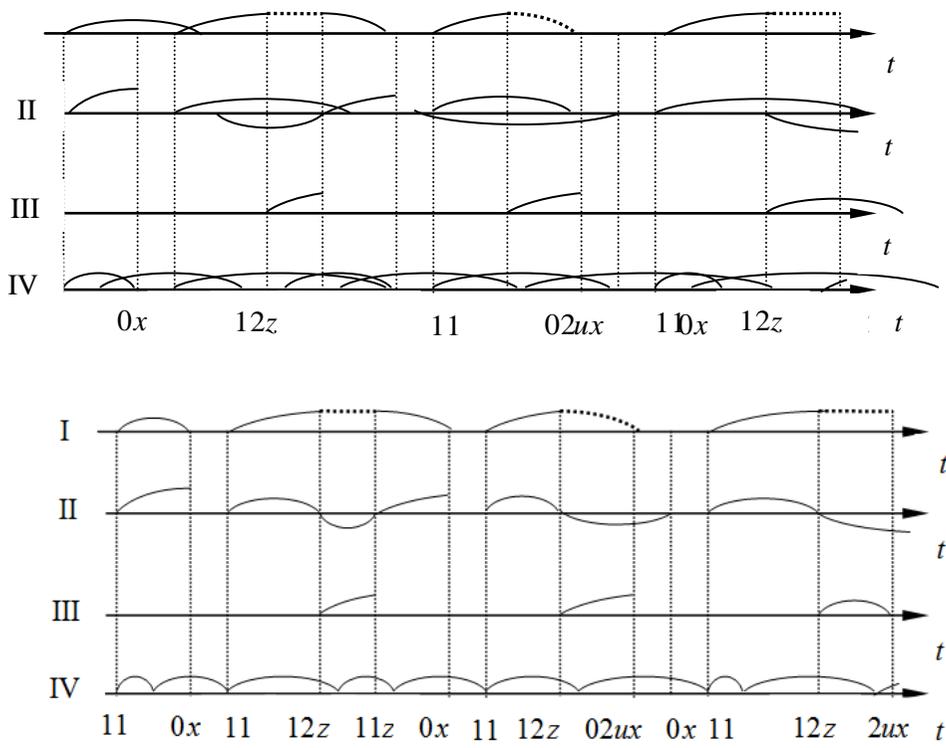


Рис. 2. Временная диаграмма функционирования системы:
 I – процесс обслуживания заявок; II – работоспособность и восстановление канала;
 III – временной резерв; IV – входящий поток заявок

Опишем события и плотности вероятностей переходов системы из состояния 11. Если за время обслуживания заявки канал не откажет, т. е. $\alpha < \gamma$, то система освободится и будет ожидать следующую заявку (перейдет в состояние 0x). Плотность вероятности этого перехода

$$p_{11}^{0x} = P\{\alpha \in dt, \alpha < \gamma, \beta_t \in dx\} = \int_0^{\infty} f(t)\bar{\Phi}(t)v_g(t,x)dt, \quad x > 0.$$

Здесь $\bar{\Phi}(t) = 1 - \Phi(t)$; $v_g(u, x)$ – плотность распределения вероятностей прямого остаточного времени восстановления β_t процесса восстановления, порожденного СВ β :

$$v_g(t,x) = g(t+x) + \int_0^t h_g(t-s)g(s+x)ds,$$

$h_g(x)$ – плотность функции восстановления $H_g(t) = \sum_{n=1}^{\infty} G^{*(n)}(t)$,

где $G^{*(n)}(t)$ – n -кратная свертка функции $G(t)$. Величина β_t фиксирует время после момента t до ближайшего момента восстановления во входящем потоке заявок (см., например, [6]).

В случае отказа канала ($\gamma < \alpha$) заявка продолжается обслуживаться за счет

временного резерва, т. е. система переходит в состояние $12z$ с плотностью вероятности перехода

$$p_{11}^{12z} = P\{\gamma \in dz, \gamma < \alpha\} = \varphi(z)\bar{F}(z), \quad z > 0.$$

Аналогично устанавливаются плотности и плотности вероятностей переходов системы из других состояний:

$$P_{0x}^{11} = 1; \quad P_{02ux}^{0,x-u} = P_{2ux}^{0,x-u} = 1, \quad u < x; \quad P_{02ux}^{0y} = P_{2ux}^{0y} = v_g(u-x, y), \quad y > 0, \quad u > x;$$

$$p_{11z}^{0,x} = \int_0^\infty \frac{f(z+t)}{\bar{F}(z)} \bar{\Phi}(t) v_g(z+t, x) dt, \quad x > 0; \quad p_{11z}^{12w} = \varphi(w-z) \frac{\bar{F}(w)}{\bar{F}(z)}, \quad w > z;$$

$$p_{12z}^{11w} = \psi(w-z) \bar{R}(w-z) \frac{\bar{F}(w)}{\bar{F}(z)}, \quad w > z;$$

$$p_{12z}^{02ux} = \int_0^\infty \frac{f(z+t)}{\bar{F}(z)} \bar{R}(t) \psi(t+u) v_g(z+t, x) dt, \quad u > 0, \quad x > 0;$$

$$p_{12z}^{2ux} = \int_0^\infty \frac{\bar{F}(z+t)}{\bar{F}(z)} r(t) \psi(t+u) v_g(z+t, x) dt, \quad u > 0, \quad x > 0.$$

Стационарное распределение вложенной цепи Маркова. Значение стационарного распределения ρ_{11} для состояния 11 и плотностей стационарного распределения $\rho(11z)$, $\rho(12z)$, $\rho(02ux)$, $\rho(2ux)$ и $\rho(0x)$ для состояний $11z$, $12z$, $02ux$, $2ux$ и $0x$ соответственно найдем из системы интегральных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(11z) = \int_0^z \psi(t) \bar{R}(t) \rho(12, z-t) dt, \\ \rho(12z) = \int_0^z \varphi(t) \frac{\bar{F}(z)}{\bar{F}(z-t)} \rho(11, z-t) dt + \rho_{11} \varphi(z) \bar{F}(z), \\ \rho(02ux) = \int_0^\infty dy \int_0^\infty \rho(12t) \frac{f(t+y)}{\bar{F}(t)} \psi(y+u) \bar{R}(y) v_g(t+y, x) dt, \\ \rho(2ux) = \int_0^\infty dy \int_0^\infty \rho(12t) \frac{\bar{F}(t+y)}{\bar{F}(t)} \psi(y+u) r(y) v_g(t+y, x) dt, \\ \rho(0x) = \rho_{11} \int_0^\infty f(t) \bar{\Phi}(t) v_g(t, x) dt + \int_0^\infty dy \int_0^\infty \rho(11t) \frac{f(t+y)}{\bar{F}(t)} \bar{\Phi}(y) v_g(t+y, x) dt + \\ + \int_0^\infty [\rho(02t, t+x) + \rho(2t, t+x)] dt + \int_0^\infty dt \int_0^\infty v_g(s, x) [\rho(02, s+t, t) + \rho(2, s+t, t)] ds, \\ \rho_{11} = \int_0^\infty \rho(0x) dx. \end{array} \right.$$

Исключая функцию $\rho(11z)$ из первых двух уравнений, приходим к уравнению восстановления относительно функции $\rho(12z)/\bar{F}(z)$:

$$\frac{\rho(12z)}{\bar{F}(z)} = \int_0^z (\varphi * \psi \bar{R})(z-y) \frac{\rho(12y)}{\bar{F}(y)} dy + \rho_{11} \varphi(z).$$

Решением этого уравнения является функция $\rho(12z) = \rho_{11} \bar{F}(z) h^{(2)}(z)$, где $h^{(2)}(z) = \sum_{k=1}^{\infty} [(\varphi * (\varphi * \psi \bar{R})^{*(k-1)})](z)$ – плотность функции $H^{(2)}(z)$ нечетных восстановлений (т. е. отказов канала) обрывающегося альтернирующего процесса восстановления, который порождается случайной величиной γ с плотностью распределения вероятностей $\varphi(z)$ и случайной величиной с несобственным распределением и плотностью $\psi(z) \bar{R}(z)$.

После этого находятся выражения для остальных плотностей стационарного распределения:

$$\rho(11z) = \rho_{11} \bar{F}(z) h^{(1)}(z),$$

где $h^{(1)}(z) = \sum_{k=1}^{\infty} (\varphi * \psi \bar{R})^{*(k)}(z)$ – плотность функции $H^{(1)}(z)$ четных восстановлений (т. е. восстановлений работоспособности канала) того же обрывающегося альтернирующего процесса восстановления;

$$\rho(02ux) = \rho_{11} \int_0^{\infty} dy \int_0^{\infty} h^{(2)}(t) f(t+y) \psi(y+u) \bar{R}(y) v_g(t+y, x) dt;$$

$$\rho(2ux) = \rho_{11} \int_0^{\infty} dy \int_0^{\infty} h^{(2)}(t) \bar{F}(t+y) \psi(y+u) r(y) v_g(t+y, x) dt;$$

$$\begin{aligned} \rho(0x) &= \rho_{11} \int_0^{\infty} f(t) \bar{\Phi}(t) v_g(t, x) dt + \rho_{11} \int_0^{\infty} dy \int_0^{\infty} h^{(1)}(t) f(t+y) \bar{\Phi}(y) v_g(t+y, x) dt + \\ &+ \rho_{11} \int_0^{\infty} ds \int_0^{\infty} dy \int_0^{\infty} h^{(2)}(z) \psi(y+s) v_g(z+y+s, x) [f(z+y) \bar{R}(y) + \bar{F}(z+y) r(y)] dz. \end{aligned}$$

Стационарная вероятность ρ_{11} находится из условия нормировки и равна

$$\rho_{11} = \left[2 + 2 \int_0^{\infty} f(t) H^{(2)}(t) dt \right]^{-1}. \quad (1)$$

Финальные вероятности состояний. Разобьем фазовое пространство состояний E на следующие непересекающиеся подмножества состояний: $E_{11} = \{11, 11z\}$ – заявка обслуживается каналом; $E_{12} = \{12z\}$ – канал восстанавливается и заявка обслуживается за счет временного резерва; $E_2 = \{02ux, 2ux\}$ – резерв исчерпан либо завершено обслуживание заявки за счет резерва, при этом продолжается восстановление канала; $E_0 = \{0x\}$ – канал свободен, находится в работоспособном состоянии и ожидает заявку.

Финальные вероятности пребывания системы в различных физических состояниях найдем с помощью предельных соотношений [5]

$$\begin{aligned}
p_i^* &= \lim_{t \rightarrow \infty} P \{ S(t) \in E_i / S(0) = x \} = \\
&= \int_{E_i} m(x) \rho(dx) \left(\int_E m(x) \rho(dx) \right)^{-1}, \quad i = 11, 12, 2, 0,
\end{aligned} \tag{2}$$

где $m(x)$ – среднее время пребывания системы в состоянии $x \in E$; $\rho(\cdot)$ – стационарное распределение вложенной цепи Маркова.

Средние времена пребывания системы в состояниях определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned}
E\theta_{11} &= \int_0^\infty \bar{F}(t) \bar{\Phi}(t) dt; \quad E\theta_{11z} = \int_0^\infty \frac{\bar{F}(t+z) \bar{\Phi}(t)}{\bar{F}(z)} dt; \quad E\theta_{12z} = \int_0^\infty \frac{\bar{F}(t+z) \bar{\Psi}(t) \bar{R}(t)}{\bar{F}(z)} dt; \\
E\theta_{0x} &= x; \quad E\theta_{02ux} = E\theta_{2ux} = u.
\end{aligned}$$

С учетом выражений для средних времен, а также найденной плотности стационарного распределения вложенной цепи Маркова интегралы в формуле (2) в результате преобразований принимают вид

$$\begin{aligned}
\int_{E_{11}} m(x) dx &= \rho_{11} \int_0^\infty \bar{F}(t) \bar{\Phi}(t) dt + \int_0^\infty \rho(1) dz \int_0^\infty \frac{\bar{F}(t+z) \bar{\Phi}(t)}{\bar{F}(z)} dt = \rho_{11} \int_0^\infty \bar{F}(t) \bar{\Phi}(t) dt + \\
&+ \rho_{11} \int_0^\infty h^{(1)}(z) dz \int_0^\infty \bar{F}(t+z) \bar{\Phi}(t) dt = \rho_{11} \left[E\alpha + \int_0^\infty \bar{F}(t) [H^{(1)}(t) - H^{(2)}(t)] dt \right];
\end{aligned}$$

$$\int_{E_{12}} m(x) dx = \rho_{11} \int_0^\infty h^{(2)}(z) dz \int_0^\infty \bar{F}(t+z) \bar{\Psi}(t) \bar{R}(t) dt;$$

$$\int_{E_{11} \cup E_{12}} m(x) dx = \rho_{11} \left[E\alpha - \int_0^\infty H^{(2)}(t) dt \int_0^\infty \bar{F}(t+y) \bar{\Psi}(y) r(y) dy \right];$$

$$\begin{aligned}
\int_{E_2} m(x) dx &= \int_0^\infty dx \int_0^\infty u [\rho(0) 2ux + \rho(2ux)] du = \\
&= \rho_{11} \left[E\sigma \int_0^\infty f(t) H^{(2)}(t) dt - \int_0^\infty h^{(2)}(y) dy \int_0^\infty \bar{F}(t+y) \bar{\Psi}(t) \bar{R}(t) dt \right];
\end{aligned}$$

$$\int_{E_0} m(x) dx = \rho_{11} \left[E\beta \bar{N} - E\alpha - \int_0^\infty \bar{F}(t) [H^{(1)}(t) - H^{(2)}(t)] dt - E\sigma \int_0^\infty f(t) H^{(2)}(t) dt \right];$$

$$\int_E m(x) dx = \rho_{11} E\beta \bar{N},$$

где $\bar{N} = 1 - \int_0^\infty H_g(t) \frac{d}{dt} [\bar{F}(t)(1 + H^{(1)}(t) - H^{(2)}(t))] dt + \int_0^\infty \bar{F}(t) h^{(2)}(t) dt \int_0^\infty \psi(s) [H_g(s+t) - H_g(t)] ds -$

среднее число заявок, поступающих в систему между двумя соседними моментами начала обслуживания заявок.

Таким образом, финальные вероятности пребывания системы в состоянии обслуживания, ожидания заявки и восстановления определяются формулами

$$\begin{aligned}
 p_{11}^* &= \left[E\alpha + \int_0^\infty \bar{F}(t) [H^{(1)}(t) - H^{(2)}(t)] dt \right] / E\beta\bar{N}; \\
 p_{12}^* &= \left[\int_0^\infty h^{(2)}(z) dz \int_0^\infty \bar{F}(t+z) \bar{\Psi}(t) \bar{R}(t) dt \right] / E\beta\bar{N}; \\
 p_{11}^* + p_{12}^* &= \left[E\alpha - \int_0^\infty H^{(2)}(t) dt \int_0^\infty \bar{F}(t+y) \bar{\Psi}(y) r(y) dy \right] / E\beta\bar{N}; \\
 p_0^* &= 1 - p_{11}^* - p_{12}^* - p_2^*; \\
 p_2^* &= \left[E\sigma \int_0^\infty f(t) H^{(2)}(t) dt - \int_0^\infty h^{(2)}(y) dy \int_0^\infty \bar{F}(t+y) \bar{\Psi}(t) \bar{R}(t) dt \right] / E\beta\bar{N}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Вероятность того, что принятая к обслуживанию заявка будет обслужена полностью, равна

$$P = \int_0^\infty F(t) dt \int_0^\infty h^{(2)}(s) r(t-s) \bar{\Psi}(t-s) ds.$$

Средние стационарные времена пребывания в состояниях. Найдем средние стационарные времена $T(E_i)$ пребывания системы в состояниях с помощью соотношений [5]

$$T(E_i) = \int_{E_i} m(x) \rho(dx) \left[\int_{E \setminus E_i} \rho(dx) P(x, E_i) \right]^{-1}, \quad i = 11, 12, 2, 0, \tag{4}$$

где $P(x, E_i)$ – вероятности переходов из состояния x в подмножество состояний E_i . Учитывая вероятности переходов вложенной цепи Маркова из состояний, а также вид стационарного распределения, интегралы в знаменателях дробей формул (4) преобразуем к виду

$$\begin{aligned}
 \int_{E \setminus E_0} \rho(dx) P(x, E_0) &= \int_{E \setminus E_{11} \cup E_{12}} \rho(dx) P(x, E_{11} \cup E_{12}) = \rho_{11}; \\
 \int_{E \setminus E_{11}} \rho(dx) P(x, E_{11}) &= \rho_{11} \left[1 + \int_0^\infty f(t) H^{(1)}(t) dt \right]; \\
 \int_{E \setminus E_{12}} \rho(dx) P(x, E_{12}) &= \rho_{11} \int_0^\infty f(t) H^{(2)}(t) dt; \\
 \int_{E \setminus E_2} \rho(dx) P(x, E_2) &= \rho_{11} \int_0^\infty f(t) [H^{(2)}(t) - H^{(1)}(t)] dt.
 \end{aligned}$$

В результате подстановки найденных выражений в формулы (4) приходим к следующим соотношениям:

$$\begin{aligned}
 T(E_{11}) &= \left[E\alpha + \int_0^{\infty} \bar{F}(t) [H^{(1)}(t) - H^{(2)}(t)] dt \right] \Bigg/ \left[1 + \int_0^{\infty} f(t) H^{(1)}(t) dt \right]; \\
 T(E_{12}) &= \left[\int_0^{\infty} h^{(2)}(z) dz \int_0^{\infty} \bar{F}(t+z) \bar{\Psi}(t) \bar{R}(t) dt \right] \Bigg/ \int_0^{\infty} f(t) H^{(2)}(t) dt \\
 T(E_{11} \cup E_{12}) &= E\alpha - \int_0^{\infty} H^{(2)}(t) dt \int_0^{\infty} \bar{F}(t+y) \bar{\Psi}(y) r(y) dy; \\
 T(E_2) &= \frac{E\sigma \int_0^{\infty} f(t) H^{(2)}(t) dt - \int_0^{\infty} h^{(2)}(y) dy \int_0^{\infty} \bar{F}(t+y) \bar{\Psi}(t) \bar{R}(t) dt}{\int_0^{\infty} f(t) [H^{(2)}(t) - H^{(1)}(t)] dt}; \\
 T(E_0) &= E\beta \bar{N} - E\alpha - \int_0^{\infty} \bar{F}(t) [H^{(1)}(t) - H^{(2)}(t)] dt - E\sigma \int_0^{\infty} f(t) H^{(2)}(t) dt.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Стационарные характеристики для системы $M/M/1/0$. В качестве частного случая рассмотрим систему обслуживания $M/M/1/0$. Пусть время β между поступлениями заявок в систему имеет плотность $g(t) = \lambda e^{-\lambda t}$; время α обслуживания заявки – плотность $f(t) = \mu e^{-\mu t}$; время γ безотказной работы канала – плотность $\varphi(t) = \eta e^{-\eta t}$; время σ восстановления канала – плотность $\psi(t) = \nu e^{-\nu t}$; резерв времени ξ – плотность $r(t) = \kappa e^{-\kappa t}$. Тогда формулы (3) и (5) для определения финальных вероятностей и средних стационарных времен пребывания в состояниях принимают вид

$$\begin{aligned}
 p_{11}^* &= \frac{\rho}{1+z}; \quad p_{12}^* = \frac{\eta\rho}{(\mu+\nu+\kappa)(1+z)}; \quad p_{11}^* + p_{12}^* = \frac{\rho}{1+z} \left(1 + \frac{\eta}{\mu+\nu+\kappa} \right); \\
 p_2^* &= \frac{\eta(\kappa+\mu)\rho}{\nu(\mu+\nu+\kappa)(1+z)}; \quad p_0^* = \frac{1}{1+z}; \\
 T(E_{11}) &= \frac{1}{\mu+\eta}; \quad T(E_{12}) = \frac{1}{\mu+\nu+\kappa}; \quad T(E_2) = \frac{1}{\nu}; \\
 T(E_{11} \cup E_{12}) &= \frac{\mu+\nu+\kappa+\eta}{\mu^2 + \mu(\nu+\eta+\kappa) + \eta\kappa}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Здесь $\rho = \frac{\lambda(\mu+\nu+\kappa)}{\mu^2 + \mu(\nu+\eta+\kappa) + \eta\kappa}$ и $z = \rho(1 + \frac{\eta}{\nu})$ – пропускная способность ка-

нала.

Заметим, что без резерва времени финальная вероятность \tilde{p}_0^* принятия заявки для ненадежной системы обслуживания без резерва времени равна [7]

$$\tilde{p}_0^* = \left[1 + \frac{\lambda}{\mu + \nu} \left(1 + \frac{\eta}{\nu} \right) \right]^{-1}.$$

Для ненадежной системы без временного резерва вероятность того, что принятая в систему заявка будет обслужена, равна $\tilde{P} = \frac{\mu}{\mu + \eta}$, а для системы с временным резервом эта же вероятность принимает значение

$$P = \frac{\mu^2 + \mu(\nu + \eta + \kappa)}{\mu^2 + \mu(\nu + \eta + \kappa) + \eta\kappa}.$$

Численный пример

Рассмотрим систему обслуживания $E_n/E_m/1/0$, в которой все описывающие ее случайные величины имеют распределение Эрланга: время между поступлениями заявок β – 2-го порядка с математическим ожиданием 2 мин; время обслуживания заявки α – 2-го порядка с математическим ожиданием 4 мин; резерв времени ξ – 2-го порядка с математическим ожиданием 10/3 мин; время восстановления канала σ – 2-го порядка с математическим ожиданием 2,5 мин и время безотказной работы канала γ – 3-го порядка со средним значением 9 мин.

Вычисления стационарных характеристик системы по формулам (3) и (5) приводят к следующим результатам: $p_{11}^* = 0,74$; $p_{12}^* = 0,04$; $p_2^* = 0,04$; $p_0^* = 0,18$; $T(E_{11}) = 3,91$ мин; $T(E_{12}) = 1,21$ мин; $T(E_{11} \cup E_{12}) = 3,89$ мин; $T(E_2) = 1,99$ мин; $T(E_0) = 1,02$ мин. Принятая к обслуживанию заявка будет обслужена до конца с вероятностью $P = 0,96$.

Заметим, что в случае отсутствия временного резерва в этой системе финальные вероятности пребывания в состояниях обслуживания заявки \tilde{p}_1^* , восстановления \tilde{p}_2^* , свободном состоянии \tilde{p}_0^* , а также средние стационарные времена пребывания в этих состояниях принимают следующие значения: $\tilde{p}_1^* = 0,64$; $\tilde{p}_2^* = 0,08$; $\tilde{p}_0^* = 0,28$; $T(E_1) = 3,51$ мин; $T(E_2) = 2,5$ мин; $T(E_0) = 1,52$ мин.

Вероятность полного обслуживания принятой заявки в этом случае будет равна $\tilde{P} = 0,82$. Следовательно, наличие резерва уменьшает вероятность принятия заявки к обслуживанию на 36 %, но на 17 % увеличивает вероятность ее полного обслуживания.

Если в системе обслуживания все случайные величины имеют показательное распределение с такими же математическими ожиданиями, как и в рассмотренном выше примере, то расчеты по формулам (6) приводят к численным значениям стационарных характеристик: $p_{11}^* = 0,53$; $p_{12}^* = 0,06$; $p_2^* = 0,08$; $p_0^* = 0,33$; $T(E_{11}) = 2,77$ мин; $T(E_{12}) = 1,05$ мин; $T(E_{11} \cup E_{12}) = 3,55$ мин; $T(E_2) = 2,5$ мин;

$T(E_0) = 2$ мин. Принятая к обслуживанию заявка будет обслужена полностью с вероятностью $P = 0,89$.

Характеристики этой же системы обслуживания без временного резерва равны $\tilde{p}_1^* = 0,5$; $\tilde{p}_2^* = 0,14$; $\tilde{p}_0^* = 0,36$; $T(E_1) = 2,77$ мин; $T(E_2) = 2,5$ мин; $T(E_0) = 2$ мин. Вероятность полного обслуживания принятой к обслуживанию заявки в этом случае будет равна $\tilde{P} = 0,69$. Таким образом, наличие резерва уменьшает вероятность принятия заявки к обслуживанию на 8 %, но на 29 % увеличивает вероятность того, что она не потеряется при обслуживании.

Выводы

В предположении общего вида распределений всех случайных величин, описывающих ненадежную одноканальную систему обслуживания, с помощью аппарата полумарковских процессов построена модель функционирования такой системы, в которой за счет случайного временного резерва продолжается обслуживание заявки после выхода из строя обслуживающего канала. В результате нахождения плотности стационарного распределения вложенной цепи Маркова как решения системы интегральных уравнений найдены эффективные выражения для вычисления стационарных характеристик системы. Показано, что вид законов распределения времен между поступлениями заявок в систему, их обслуживания, отказов и восстановлений канала оказывают существенное влияние на численные значения стационарных характеристик системы и эффективность метода временного резервирования для повышения надежности системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ushakov I.A.* Probabilistic Reliability Models. – Wiley, 2012. – 244 p.
2. *Половко А.М., Гуров С.В.* Основы теории надежности. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
3. *Черкесов Г.Н.* Надежность аппаратно-программных комплексов: Учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
4. *Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
5. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
6. *Байхельт Ф., Франкен П.* Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
7. *Якушев Ю.Ф.* Об одной задаче обслуживания потока вызовов ненадежными приборами // Проблемы передачи информации. – 1969. – Т. V. – Вып. 4. – С. 84-88.

Статья поступила в редакцию 15 января 2017 г.

SEMI-MARKOV MODEL OF UNRELIABLE RESTORABLE REDUNDANT LOSS ONE-SERVER QUEUEING SYSTEM

A.I. Peshansky

Sevastopol State University
33, Yniversitetskaya, Sevastopol, 299053

E-mail: peshansky_sntu@mail.ru

The object of research is one-server unreliable loss queueing system. The server can fail while customer service. Then immediately server restoration begins. The customer service continues due to time redundancy which is a random variable. If time redundancy is enough to complete the service, the service goes on and the next customer is taken into service after the end of restoration only. If time redundancy is not enough to complete the service, the customer is lost and does not arrive again, the next customer is taken into service after the end of restoration. Stationary characteristics of the queueing system are obtained under the assumption that all the random variables describing the system have distributions of general type.

Keywords: *unreliable one-server queueing system, semi-Markov process with a discrete-continuous phase state space, the embedded Markov chain stationary distribution, final probabilities of states, average stationary sojourn time in states.*