

та операции);  $\widetilde{\Phi}_{об}$  – обобщенная модель (отображение), ставящая в соответствие множествам  $\Delta_{с\beta}$  и  $\Omega$  множество результатов  $X(G)$ ;  $W$  – показатель эффективности;  $\Psi$  – оператор соответствия "результат-показатель";  $K$  – критерий эффективности;  $P$  – модель предпочтений ЛПР на элементах множества  $\langle \Delta_{с\beta}, \Omega, G, X, \Psi, W, K \rangle$ ,  $\Theta$  – информация ЛПР об элементах проблемной ситуации. Центральную роль в модели (1) играют два ее основных элемента  $P$ ,  $\Theta$ , так как они, по сути, представляют собой знания ЛПР о предметной области, в рамках которой осуществляется исследование эффективности систем. Используя указанную информацию, ЛПР последовательно формирует множества  $\Delta_{с\beta}, \Omega, X, \Psi, W, K$  и соответствующие отображения  $\widetilde{\Phi}_{об}, \Delta_{с\beta}$ .

В этом случае два основных класса задач исследования эффективности с учетом приведенной модели проблемной ситуации (1) могут быть представлены в следующем виде [8–10]:

– задачи анализа эффективности КИС

$$\Psi : \{X \mid \widetilde{\Phi} : \Delta_{с\beta} \times \Omega \xrightarrow{\theta} X(G)\} \xrightarrow{\theta} W ; \quad (2)$$

– задача выбора рациональной (оптимальной) КИС

$$P \xrightarrow{\theta} K : \Delta_{с\beta} \xrightarrow{W} \Delta_{с\beta}^* . \quad (3)$$

В выражении (2) задается не одно, а множество отображений, так как при исследовании эффективности, как правило, необходимо использовать не один, а несколько классов моделей (принцип полимодельности в системных исследованиях). Реализация принципа внешнего дополнения в моделях (2)–(3) находит свое отражение в задании множества исходной информации  $\Theta$  об элементах предметной области.

Результаты сравнения соотношений (1)–(3) с выражениями, приведенными в [7–8], показывают, что задачи исследования эффективности КИС являются важнейшим подклассом задач подготовки и принятия решений в сложных организационно-технических системах (СОТС) для тех ситуаций, когда максимальный уровень детализации описания процессов функционирования вышеперечисленных систем ограничивается уровнем описания комплексов операций, выполняемых данными системами. При этом основным объектом исследования в указанном подклассе задач являются закономерности, определяющие взаимное влияние субъективных и объективных условий выполнения операций, а также их влияние на результаты применения рассматриваемых систем непосредственно по целевому назначению.

Таким образом, центральными проблемами при постановке и решении различных задач исследования эффективности, также как и в целом для задач выбора, являются проблемы полимодельности и многокритериальности при описании каждой конкретной предметной области. При этом среди возможных постановок задач полимодельного многокритериального исследования эффективности систем можно выделить три, которые являются в настоящее время наиболее перспективными [2–8].

Вариант I. Постановка и решение задачи однокритериальной оптимизации показателя эффективности (ПЭ) на аналитической модели большой размерности как задачи выбора, осуществляемого путем формальной декомпозиции и проведения оптимизации на частных моделях по частным ПЭ с использованием того или иного правила согласования, обеспечивающего сходимость процесса оптимизации к решению исходной задачи. В работах [1–2, 7–10] описаны методы и алгоритмы решения указанного класса задач.

Вариант II. Постановка задачи однокритериальной оптимизации ПЭ на имитационной модели большой размерности как задачи выбора, осуществляемого путем неформальной декомпозиции задачи, построения совокупности аналитических моделей, отражающих различные стороны функционирования системы и имеющих приемлемую размерность, согласования аналитических моделей по принципу Парето и проведения имитационных экспериментов с паретовскими альтернативами с целью поиска точки, доставляющей экстремум исходному показателю эффективности системы.

Таким образом, в основу данной постановки задачи положена гипотеза о том, что экстремум по исходному (глобальному внешнему) показателю эффективности достигается в одной из точек множества Парето, определяемых при оптимизации по частным ПЭ, выявленных в результате неформальной декомпозиции. В частности, данная гипотеза выполняется во всех случаях, когда имеет место такая монотонная зависимость, при которой значения внешнего ПЭ не убывают, если не убывают значения частных ПЭ. Свойство монотонности в случае задания всех функций в аналитическом виде может быть установлено в результате соответствующего аналитического исследования. Однако, во многих случаях практики внешний ПЭ не может быть представлен через частные ПЭ в аналитическом виде и его значения могут быть определены лишь посредством имитационных экспериментов. В этих случаях монотонность может быть установлена на основе определенных "физических свойств" моделируемой системы [2, 4, 8].

Вариант III. Постановка задачи многокритериальной оптимизации на комплексе моделей как задачи выбора со многими отношениями предпочтения, осуществляемого путем задания множества Парето с помощью основополагающей многокритериальной модели, сужения этого множества на основе машинного анализа его свойств и введения соответствующей информации в ходе интерактивной процедуры, выполняемой ЛПР, лицом, обосновывающим решения (ЛОР) с ЭВМ, а также на основе привлечения дополнительных математических моделей, обеспечивающих последующее уточнение и сужение множества Парето вплоть до принятия единственного решения.

Паретовский принцип согласования при условии дополнения его положениями о сужении множества Парето создает наиболее благоприятные возможности для принятия всесторонне обоснованных решений, основывающихся на анализе поведения различных показателей эффективности внутри этого множества. При этом важное значение имеет правильная разработка стратегии сужения с привлечением компетентных специалистов и математических моделей: аналитических и имитационных.

Рассмотрим, как перечисленные теоретические подходы к формализации и решению задач многокритериального оценивания и выбора эффективных решений могут быть реализованы на практике. Проведенный анализ применительно к сфере автоматизации управления органами государственной власти показал, что при оценивании эффективности информационных технологий, обеспечивающих поддержку принятия решений, целесообразно ориентироваться на концепцию построения и использования имитационных систем (ИМС) – рис. 1.

В зависимости от состава, структуры ИМС и поддерживаемых ею функций той предметной области, для которой она создавалась, целесообразно различать широко-специализированные (проблемно-ориентированные) и узкоспециализированные (частные) ИМС.

Создание ИМС так же, как и имитационных моделей (моделей имитационного уровня), представляет сложный многоэтапный итерационный процесс, основная особенность которого (по сравнению с «чисто» имитационным моделированием) состоит в необходимости на каждом из этапов исследования проводить согласование (на концеп-

туальном, алгоритмическом, информационном и программном уровне) разнородных моделей, описывающих различные стороны функционирования объекта.

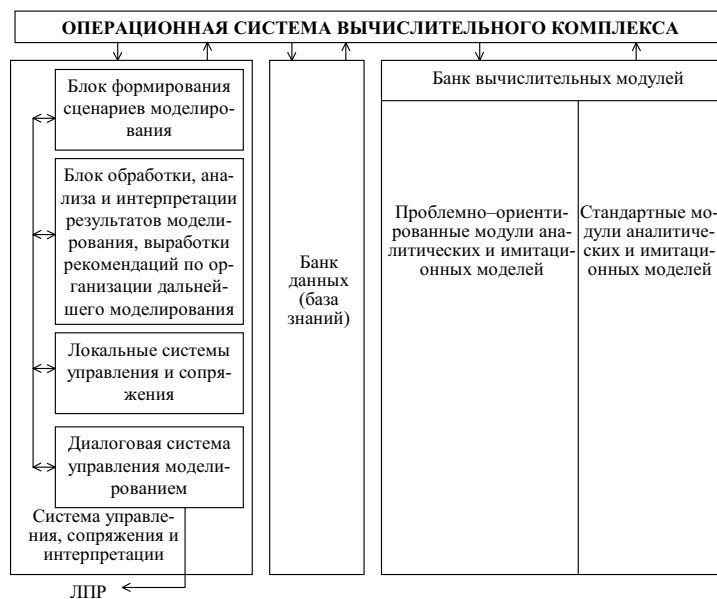


Рис. 1. Типовая структура имитационной системы

В современных ИМС выбор допустимых альтернатив основывается на сужении (сжатии) множества рассматриваемых вариантов экзогенных переменных путем отбраковки доминируемых по заданным отношениям предпочтения альтернатив. Указанные процедуры по своему содержанию близки к идеям, реализованным в многочисленных модификациях метода «ветвей и границ». При отбрасывании доминируемых экзогенных переменных в зависимости от этапа решения задачи выбора, обеспеченности исходными данными ЛПР пользуется каждый раз такими моделями и методами получения релаксированных решений исходной задачи, чтобы оценки затрат на реализацию полученных решений (затрат на расход используемого ресурса) не убывали и становились все более и более точными по мере сужения множества допустимых альтернатив.

К настоящему времени разработаны многочисленные подходы, способы, методы, алгоритмы и методики координационного выбора на комплексах разнородных моделей, входящих в состав ИМС и описывающих различные предметные области [8–10], которые отличаются друг от друга способами генерации допустимых альтернативных решений в задачах анализа и выбора эффективных КИС; правилами проверки алгоритмически и аналитически заданных ограничений; способами перехода от одного шага интерактивного сужения множества допустимых альтернатив к другому шагу.

В докладе приводятся результаты оценивания эффективности использования информационных технологий в исполнительных органах государственной власти применительно к Санкт-Петербургу. При расчете ряда показателей эффективности использовался разработанный под руководством автора программный комплекс, в основу которого были положены рассмотренные в докладе методологические и методические основы комплексного моделирования КИС на различных этапах ее жизненного цикла. На рис. 2 представлены результаты аналитико-имитационного моделирования функционирования КИС на этапе применения. На аналитических моделях, базирующихся на подходах, используемых в управляемой структурной динамике, проводился расчет перечисленных на рис. 2 показателей. На имитационных стохастических моделях, реализованных в среде GPSS, осуществлялась проверка робастности полученных решений относительно принятых исходных данных.



**Рис. 2. Показатели эффективности информатизации органов исполнительной власти Санкт-Петербурга**

Кроме того, для верификации и валидации разработанных моделей в конце года проводилось сравнение результатов моделирования с реальными данными, полученными на практике.

### Литература

1. **Юсупов Р. М., Заболотский В. П.** Концептуальные и научно-методологические основы информатизации. СПб.: Наука, 2009. 543с.
2. **Калинин В. Н., Резников Б. А.** Теория систем и управления (структурно-математический подход). Л.: ВИКИ. 417 с.
3. **Кини Р. Л., Райфа Х.** Принятие решений при многих критериях. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
4. **Краснощеков П. С., Морозов В. В., Федоров В. В.** Декомпозиция в задачах проектирования// Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, 1979. 6N02. С. 7–8.
5. Математическое обеспечение управления подвижными объектами: Учебн. пос. / Б.А. Резников, И.И.Делий, Б.В. Москвин и др. МО СССР, 1986. 149 с.
6. **Месарович М., Мако Д., Такахара Я.** Теория иерархических многоуровневых систем / Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 312 с.
7. Методологические вопросы построения имитационных систем: Обзор /С.В. Емельянов, В.В. Калашников, В.И. Лутков и др. / Под научн. ред. Д.М. Гвишиани, С.В. Емельянова. М.: МЦНТИ, 1973. 87 с.
8. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. /Ред. совет: Б. С. Авдудевский (пред) и др. Машиностроение, 1988, т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред А. Ф. Уткина, Ю. Б. Крючкова. 328 с.
9. **Цвиркун А. Д., Акиндиев В. К.** Структура многоуровневых и крупно-масштабных систем (синтез и планирование развития).М.: Наука, 1993. 160 с.
10. **Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Юсупов Р. М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ МУРАВЬИНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА

Д. А. Черкасов (Санкт-Петербург)

### Задача коммивояжера

Найти кратчайший гамильтонов цикл в полном взвешенном симметричном графе, где вершины графа – города, а ребра – дороги между городами. Весам ребер соответствуют расстояния  $c_{ij}$ .

Задача коммивояжера встречается:

- при решении транспортных проблем;
- при проектировании интегральных схем с большим уровнем интеграции, где требуется соединить между собой компоненты;
- на производстве, где может, например, потребоваться определить кратчайший путь движения детали по конвейеру.

### Муравьиные алгоритмы

В основу муравьиных алгоритмов оптимизации положена имитация жизнедеятельности муравьиных колоний. При этом колония рассматривается как многоагентная система, в которой каждый агент (муравей) действует автономно по несложным правилам. Несмотря на простоту поведения каждого агента в отдельности, поведение всей системы получается очень разумным.

Муравьиные алгоритмы основаны на вероятностном выборе. С большей вероятностью будет выбрана вершина (город), если расстояние до нее меньше, чем до других и на пути к ней отложено больше феромона. Кроме того, в ходе алгоритма муравьи откладывают на ребрах феромон, который испаряется со временем. Количество феромона на ребре, ведущем к вершине, также влияет на вероятность ее выбора.

Поскольку в основе алгоритма лежит моделирование передвижения муравьев по различным путям, такой подход может стать эффективным способом поиска рациональных решений для задач оптимизации, допускающих графовую интерпретацию.

### Реализация имитационной модели

Имитационная модель была реализована в среде AnyLogic [5], предоставляющей удобную среду для создания имитационных моделей.

Среда AnyLogic использует язык программирования Java, что позволяет реализовать модели любой сложности. Среда предоставляет удобные средства разработки разных типов моделей, в том числе многоагентных. Кроме того, в AnyLogic встроены богатые средства визуализации результатов.

При разработке модели был использован многоагентный подход [6]. Применение данного подхода позволило описать поведение каждого муравья как агента, который движется по графовой структуре, задаваемой списком вершин и узлов, инициализирующимися при запуске программы.

В модели агентами являются муравьи. Каждому агенту соответствует один муравей.

#### *Состояние агента*

Каждый агент обладает собственным состоянием, определяемым полями:

- список вершин, которые необходимо посетить;
- вершина, с которой муравей начал цикл;
- текущая вершина (на этапе выбора следующей вершины);

- вершина, к которой движется муравей;
- ребро, по которому муравей производит движение;
- список посещенных ребер;
- оставшееся время жизни.

*Действия на шаге*

В системе AnyLogic можно задавать действия для каждого объекта на каждом шаге моделирования. Обновлением «лучшего маршрута» занимается муравей, его нашедший. При достижении агентом вершины вычисляется уровень феромона для только что пройденного ребра и обновляется список посещенных вершин.

Реализация действий агента на шаге приведена ниже (ЯП Java).

```

if ( isActive == false )
    return ;
// Если все вершины пройдены - замкнуть маршрут
if ( startNode != null && nodes_to_visit . size () == 0 ) {
    nodes_to_visit . add ( startNode );
    startNode = null ;
}
else // Маршрут готов
if ( startNode == null && nodes_to_visit . size () == 0 ) {
    route . length = pathLen ;
    Main m = ( Main ) getOwner () ;
    if ( m . shortestP . length > pathLen ) {
        // Обновить кратчайший маршрут, если он найден
        m . shortestP = route ;
        m . isFreshPath = true ;
    }
    if (-- lifeTime == 0) {
        isActive = false ;
    }
    else // Перезапустить муравья для следующей итерации
        reinit () ;
    return ;
}
if ( isOnEdge )
    moveTo ( destNode .cx , destNode .cy);
else
{
    nodes_to_visit . remove ( curNode );
if ( nodes_to_visit . size () == 0)
    return ;
// choose the next node
destNode = chooseNode ();
curEdge = getInc ( curNode , destNode );
isOnEdge = true ;
}

```

*Выбор следующей вершины*

Выбор следующей вершины осуществляется на основе вероятностного правила.

Вероятность перехода муравья из города  $i$  в город  $j$  :

$$P_{ij,k} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}(t)]^\beta}, & j \in J_{i,k} \\ 0, & j \notin J_{i,k} \end{cases} \quad 1)$$

$\alpha$  – это параметр, задающий вес следа феромона [3]. При  $\alpha = 0$  алгоритм вырождается до жадного алгоритма (будет выбран ближайший город). Параметр  $\beta$  определяет вес расстояния при расчете вероятности.

Ниже приведена процедура выбора вершины (ЯП Java).

```
double P;
ArrayList an = nodes_to_visit ;
ArrayList Pi = new ArrayList ();
Node ni = curNode ;
for (int j = 0; j < an. size (); j ++) {
    double denum = 0;
    Node nj = ( Node ) an. get (j);
    for (int l = 0; l < an. size (); l ++) {
        Node nl = ( Node ) an. get (l);
        denum += pow ( tau (ni ,nl), alpha ) * pow (nu(ni ,nl), beta );
    }
    double num = pow ( tau (ni ,nj), alpha ) * pow (nu(ni ,nj), beta );
    Pi. add ( num / denum );
}
probs = Pi;
int n = randSel (Pi);
return ( Node ) an. get (n);
```

Когда муравей прошел все вершины, он «перезапускается». Останов произойдет, когда он пройдет число итераций, равное времени жизни колонии.

На рис. 1 показана работа модели.

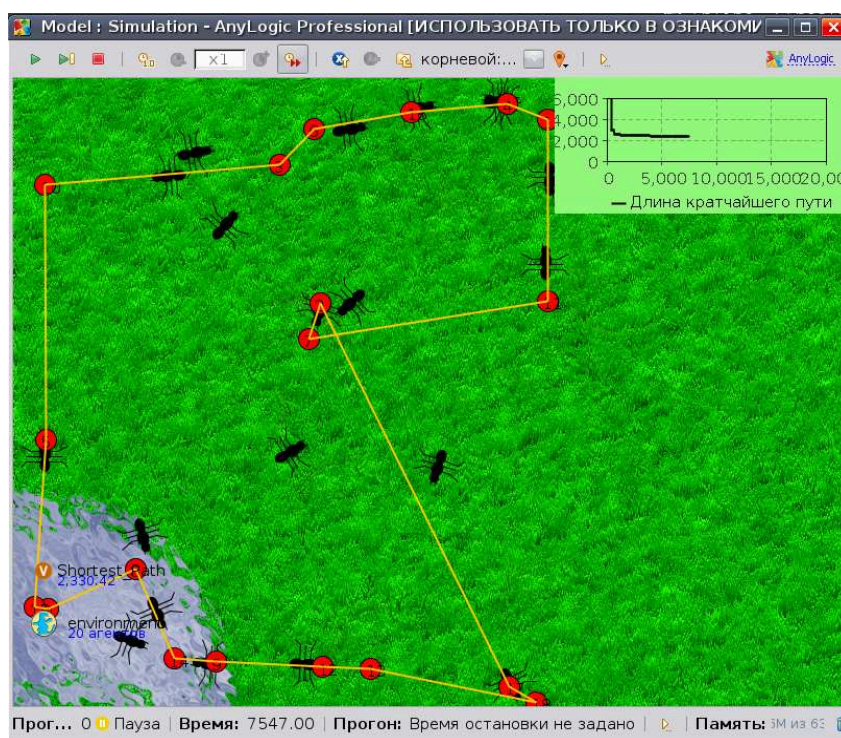


Рис. 1

### Эксперимент

Цель эксперимента – установить **скорость сходимости алгоритма** (длину кратчайшего пути) и **зависимость времени решения задачи от количества вершин**.

*Входные данные эксперимента*

Параметры эксперимента можно разделить на **параметры задачи** и **параметры алгоритма**.

К **параметрам задачи** относится количество вершин и их расположение:

- случайное;
- близкое к выпуклому;
- предопределенное.

К **параметрам алгоритма** относится расположение и количество муравьев, коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , а также коэффициент испарения феромонов.

В [4] дано оптимальное количество муравьев, равное 10, которое и используется в эксперименте.

Для эксперимента были заданы следующие входные параметры:

- число муравьев – 10;
- расположение муравьев – случайное;
- $\alpha = 0.5$ ;  $\beta = 2$ ;  $\rho$  (коэффициент испарения) = 0.001;
- время жизни колонии – 100;
- расположение вершин – предопределенное.

*Скорость сходимости*

На рис. 2 можно увидеть как быстро алгоритм сходится к оптимальному решению. Число вершин равно 40.

По оси ОХ на графике приведено модельное время, а по ОУ – длина кратчайшего пути.

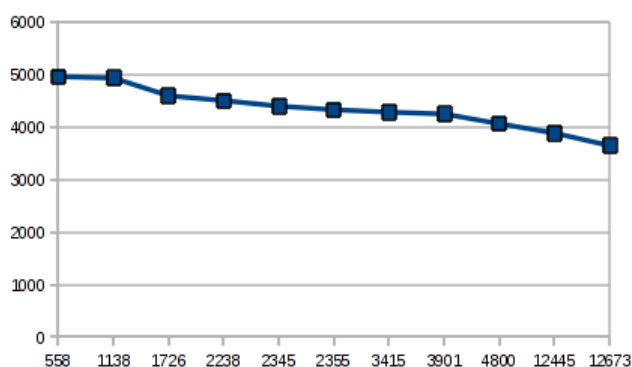


Рис. 2

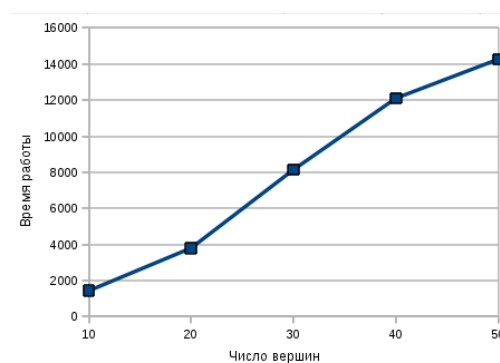


Рис. 3

*Зависимость времени решения от размерности задачи*

Размерность задачи – число вершин изменялось от 10 до 50 с шагом 10. Каждое моделирование проводилось до тех пор, пока не истекло время жизни колонии. Под временем работы понимается модельное время системы в момент последнего улучшения маршрута.

Зависимость времени работы от размерности задачи близка к линейной (рис. 3). В силу вероятностных свойств алгоритма полученные решения не являются оптимальными, однако достаточно хорошо аппроксимируют идеальные решения (разница составляет не более 10%).

**Выводы**

В данной работе показана возможность применения многоагентного имитационного подхода для решения поставленной задачи. Результаты экспериментов свидетель-



ствуют об эффективности данного подхода. Разработанная модель наглядно демонстрирует работу алгоритма. Естественными улучшениями данной работы может служить введение ограничений на граф, возможность его изменения на этапе работы модели, улучшения алгоритма, а также реализация других алгоритмов.

#### Литература

1. **Denebourg J. L., Pasteels J. M. et Verhaeghe J. C.** Probabilistic Behaviour in Ants : a Strategy of Errors? // Journal of Theoretical Biology. 1983. No 105.
2. **Dorigo M., Caro G. Di & Gambardella L. M.** Ant Algorithms for Discrete Optimization // Artificial Life, 1999. 5 (2). P. 137–172.
3. **Кирсанов М. Н.** Графы в Maple. Задачи, алгоритмы, программы. М: Физматлит, 2007.
4. **Dorigo M. Gambardella L. M.** IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.1, No.1, 1997 Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem.
5. Сайт производителя AnyLogic <http://www.xjtek.ru/>
6. **Карпов Ю. Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5.

## РЕФЕРАТЫ

**Абрамов К. Г., Монахов Ю. М., Бодров И. Ю. К вопросу о моделировании топологии социальной сети. С. 11.**

Работа посвящена проблеме определения топологии социальной сети. Рассматриваются различные точки зрения на этот вопрос. Приводятся результаты экспериментальных исследований и их анализ. Решается поставленная задача об определении топологии.

**Аксенов К. А., Кай Ван, Антонова А. С., Аксенова О. П., Липодаева А. А., Смолий Е. Ф. Разработка и применение системы поддержки принятия решений в управлении строительством. С. 15.**

В работе рассматривается автоматизация процесса управления строительным холдингом на основе имитационного моделирования и информационной технологии интеллектуальных агентов.

**Аксенов К. А., Сафрыгина Е. М., Скворцов А. А., Смолий Е. Ф., Аксенова О.П. Гибридная система поддержки принятия решений для планирования перевозок сети автозаправочных станций. С. 20.**

В работе рассматривается разработка гибридной системы поддержки принятия решений для планирования перевозок сети автозаправочных станций.

**Амен Соуд Абдалазез Мохаммед. Агентная имитационная модель анализа процессов управления предприятиями нефтепродуктообеспечения. С. 25.**

Рассмотрены основные особенности анализа процессов нефтепродуктообеспечения с позиций логистического подхода и имитационного моделирования. Предложена агентная имитационная модель анализа потоковых процессов в цепочке поставок «сеть нефтебаз – сеть АЗС». Описаны основные особенности поведения и взаимодействия агентов при моделировании процессов доставки нефтепродуктов на АЗС. Разработанная компьютерная система может быть использована для принятия решений по эффективному управлению потоковыми процессами в интегрированных комплексах хранения и распределения нефтепродуктов.

**Анцев В.Ю., Шафорост А.Н. Применение математического моделирования при проектировании транспортно-накопительных систем промышленных предприятий. С. 30.**

Представлена методика структурно-параметрического синтеза транспортно-накопительных систем промышленных предприятий, математическая модель, позволяющая оптимизировать состав вспомогательного оборудования и компоновочную структуру производственных систем для конкретных условий производства; проверка полученного варианта транспортной системы путем проведения имитационного моделирования.

**Бабишин В. Д., Давыдов А. Н., Дедков В. К., Дорошенко М. А. Имитационное моделирование нестационарных случайных процессов на основе разложения исследуемой функции в интеграл Фурье. С. 33.**

Предлагается новый метод решения задачи оперативного анализа технического состояния сложных объектов управления на основе имитационного моделирования нестационарных случайных процессов функционирования данных объектов в виде разложения в интеграл Фурье на ограниченном временном интервале нестационарных процессов в среде AnyLogic и проверки данных процессов на стационарность. Данный метод позволяет существенно повысить оперативность принятия решений по предотвращению нештатных ситуаций сложных объектов управления.

**Бахиркин М. В., Кан А. В., Канадин В. Н. Комплекс полунатурного моделирования интегрированных систем управления воздушным движением. С. 39.**

В докладе рассмотрена задача создания комплекса полунатурного моделирования интегрированных систем управления воздушным движением (КИС УВД). Целями создания КИС УВД являются отработка и исследования различного спектра задач, связанных с бортовой и наземной составляющими систем управления и организации воздушного движения; оценка эффективности применения новых бортовых средств и возможностей CNS/ATM; имитация наземного движения воздушных судов в аэропорту для отработки перспективных функций развитой системы управления наземным движением и контролем – A-SMGCS. Комплекс является сложной технической системой управления сверхвысокой размерности, включающий в себя различные программно-реализуемые имитационные модели.

**Боев В. Д., Рыжиков Д. М. Имитационная модель технологических процессов изготовления электромеханических модулей. С. 47.**

Описывается разработанная в объектно-ориентированной системе моделирования AnyLogic имитационная модель технологических процессов изготовления электромеханических модулей, предназначенная для использования инженером-технологом. Приводятся фрагменты реализации и примеры использования.