

*Розвиток логістики в даний час все вира-
зніше підкреслює специфіку задач опти-
мізації логістичних систем – прийнят-
тя рішень в умовах невизначеності. До
таких завдань відносять задачі, для яких
із-за впливу зовнішніх, що не залежать від
особи, що приймає рішення (ОПР), випад-
кових впливів або факторів кінцевої еко-
номічний результат заздалегідь не визна-
чений*

*Ключові слова: критерій оптимізації,
параметрична модель, нормовані значення
прибутку, термінальне управління, дворів-
неве оптимальне управління, логістична
система, невизначеність, багатофактор-
не оцінювання, оптимістичний критерій,
математичні моделі ідентифікації*

*Развитие логистики в настоящее время
все отчетливее подчеркивает специфи-
ку задач оптимизации логистических сис-
тем – принятие решений в условиях нео-
пределенности. К таким задачам отно-
сят задачи, для которых из-за влияния
внешних, не зависящих от лица, принима-
ющего решения (ЛПР), случайных воздей-
ствий или факторов конечный экономиче-
ский результат заранее не определен*

*Ключевые слова: критерий оптимиза-
ции, параметрическая модель, нормиро-
ванные значения прибыли, терминальное
управление, двухуровневое оптимальное
управление, логистическая система, нео-
пределенность, многофакторное оценива-
ние, оптимистический критерий, матема-
тические модели идентификации*

УДК 656.029

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60838

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

В. А. Доровской

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: dora1943@mail.ru

А. А. Железняк

Ассистент*

E-mail: zheleznyak13@mail.ru

О. В. Бабина

Ассистент**

E-mail: babina_ola@mail.ru

И. В. Антипенко

Ассистент**

E-mail: a.sofi@mail.ru

В. Ю. Будник

Аспирант*

E-mail: bydja2@yandex.ru

*Кафедра «Электрооборудование судов и
автоматизации производства»***

**Кафедра «Экономика предприятия»

***Керченский государственный

морской технологический университет

ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь, Республика Крым, 298309

1. Введение

Современная логистика все отчетливее подчеркивает специфику задач оценки рентабельности и оптимизации логистических систем. В связи с этим процедура принятия логистических решений является осознанным выбором конкретного решения из некоторого допустимого множества альтернатив, т. е. является субъективным интеллектуальным процессом, что делает её крайне сложным объектом формализации. Мощным стимулом развития исследований по созданию нормативной теории принятия решений явилось бурное развитие вычислительной техники и широкая информатизация всех отраслей экономики на основе создания автоматизированных систем управления (АСУ). В этих условиях уровень формализации теории принятия решений стал сдерживающим фактором, определяющим уровень интеллектуализации АСУ. Это послужило мощным стимулом интенсифика-

ции исследования в области формализации процессов принятия решений. В работах [1–4] сформулированы необходимые условия эффективности принимаемых решений. К ним относятся своевременность, полнота (комплексность) и оптимальность принимаемых решений.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В теории принятия решений термин «неопределенность» отражает не столько неопределенность реального материального мира, сколько уровень наших знаний, понимания, изученности различных процессов, их взаимосвязи, возможности и точности измерения различных величин. Это означает, что следует говорить не о неопределенности реальной ситуации принятия решений, а о неопределенности абстрактной мо-

дели, на основе которой принимается решение. В связи с этим, анализ источников неопределенности при принятии решений целесообразно проводить с позиций системного анализа процесса синтеза абстрактных моделей и его этапов [5]. Независимо от предметной области, процесс принятия решений можно структурировать на четыре этапа: формирование цели; определение множества допустимых решений X ; обоснование метрики, в которой проводится оценивание эффективности $K(x)$; вычисление эффективного решения $x^0 \in X$. Этой последовательности будем придерживаться при анализе источников неопределенности при принятии решений [1, 2]. Формулирование и формализация цели является концептуальным и вместе с этим сложным этапом. Это обусловлено тем, что формулировка цели носит аксиоматический характер и во многом определяет характеристики системы. Именно поэтому стандарты [5–7] регламентирующие процесс проектирования, выделяют процесс целеполагания в особый этап. Он состоит из двух процедур: технико-экономического обоснования (ТЭО), во время которого производится оценка принципиальной реализуемости и целесообразности достижения цели; составления технического задания (ТЗ), которое на количественном и качественном уровнях определяет все значимые характеристики (свойства) системы.

Важность, сложность и значимость этапа формирования и формализации цели характеризуется тем, что на него затрачивается до 40 % общего объема временных и финансовых ресурсов [8]. В дальнейшем будем полагать этап целеполагания внешним по отношению к процедуре принятия решения и возникающие на нем неопределенности не будем учитывать.

Для анализа источников неопределенности на последующих этапах процедуры принятия решений введем понятие абстрактной модели системы. Как следует из определения абстрактной системы, все свойства (характеристики) системы порождаются ее структурой. Отсюда вытекает, что для синтеза системы, с заданными техническим заданием конкретными свойствами P_k , необходимо определить такое подмножество элементов $P_k \rightarrow M: M_k$ и отношений $R_k \rightarrow R: R_k$, на которых в принципе можно синтезировать структуры, порождающие требуемые свойства

$$P_k = \theta(C) = \theta \langle M_k \times R_k \rangle, \quad (1)$$

где M и R – соответствующие универсумы.

Это означает, что для осознанного целенаправленного синтеза системы необходима абстрактная модель, устанавливающая формальную связь между структурой системы C и ее свойствами P . Для формального определения абстрактной модели воспользуемся понятием абстрактного формального языка, под которым понимается [9] некоторый алфавит (набор понятий, символов, операндов) и грамматика, определяющая правила записи высказываний на этом языке. Тогда любое высказывание, записанное на абстрактном языке, является формулой, а набор формул, описывающих процесс, явление, систему в целом – абстрактной моделью [9]. В зависимости от вида абстрактного языка можно выделить вербальные, графические, химические, математические и т. д. модели. Выбор адекватного описания определяется целями моделирования

и спецификой объекта. Широко распространенной является практика описания сложных систем и процессов набором различных специализированных абстрактных моделей, которые наиболее удобны и вместе с этим адекватны локальным процессам или этапам анализа. В дальнейшем будем различать имитационные и оптимизационные модели. Этап формирования допустимого множества решений включает в себя две процедуры [9–12]: определение множества возможных решений X^B ; выделение подмножества допустимых решений $X \subset X^B$.

С формальной точки зрения определение множества X^B означает отображение требуемых целевых свойств системы P на универсумы элементов M и отношений R с последующим формированием на выделенных подмножествах всех возможных структур. Однако такая нереализуема, в частности потому, что универсумы элементов и отношений не определены. На практике для формирования X^B используются: экспертные «мозговые штурмы»; информация об известных прототипах; результаты анализа патентных источников, фундаментальных и прикладных научных исследований и т. д. [13]. Такой способ формирования не гарантирует полноту множества возможных решений. Независимо от этого не все выделенные возможные решения X^B являются допустимыми по экономическим, социальным, экологическим, нормативно-правовым соображениям. Это обусловлено, во-первых, внешними (экзогенными) ограничениями, формируемыми метасистемой для обеспечения достижения своих целей, а во-вторых, внутренними (эндогенными) экономическими, технологическими, конкурентными и т. д. соображениями [14, 15].

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящих исследований является повышение качества принимаемых решений путем формализации каждой конкретной оптимизационной задачи при анализе системы логистики в условиях неопределенности. Для достижения поставленной цели ставились следующие задачи:

- выбор среднеквадратичного критерия оптимизации;
- формулирование теоремы об оптимальном терминальном управлении системой;
- формулирование уравнения оптимизации следящего режима системы.

4. Оптимизация критериев принятия решений в условиях неопределенности

Следующим этапом процедуры принятия решений является формирование критерия оценки эффективности, т. е. метрики, в которой производится сравнение «качества» допустимых решений $x \in X$. В условиях многокритериальности наиболее перспективным подходом к решению проблемы оценивания является формирование обобщенной скалярной многофакторной оценки $P(x)$ на множестве частных критериев

$$k_j(x), j = \overline{1, m}.$$

Для этого необходимо решить задачу структурно-параметрической идентификации модели формирования $P_1(x)$. Принципиальная особенность этой задачи связана с тем, что процедура оценивания является интеллектуальным процессом, реализуемым лицом принимающим решение (ЛПР) или экспертами, т. е. необходимо идентифицировать модель интеллектуальной деятельности. Трудность решения этой задачи обусловлена двумя обстоятельствами.

Во-первых, в настоящее время знания о закономерностях функционирования человеческого мозга при решении творческих задач вообще и задач оценивания, в частности, недостаточны для синтеза функциональной, т. е. отражающей действительные процессы, модели оценивания [4, 6, 8]. Альтернативой является синтез модели не прямой аналогии, т. е. полинома, который не имеет функционального содержания, но достаточно точно аппроксимирует зависимость между входным и выходным воздействиями модели [5, 8, 9]. В настоящее время в качестве таких полиномов наиболее часто используются следующие функции полезности [8, 9]:

– аддитивная

$$P_1(x) = \sum_{j=1}^m \lambda_j k_j(x), \tag{2}$$

– мультипликативная

$$P_2(x) = \prod_{j=1}^m k_j(x), \tag{3}$$

или ее разновидность, известная как функция Кобба-Дугласа

$$P_3(x) = \prod_{j=1}^m [k_j(x)]^{\alpha_j}. \tag{4}$$

Здесь λ_j – коэффициенты изоморфизма разнородных по размерности частных критериев; $k_j(x)$, $j = 1, m$ – частные критерии; α_j – коэффициенты нелинейности.

5. Разработка и оптимизация логистической системы в условиях неопределенности

Исходные данные любой задачи оптимизации логистической системы (ОЛС) представляют собой комбинацию неопределенных и детерминированных величин различных типов. С учетом этого исходная задача оптимизации примет вид

$$x^0 = \arg \max_{x \in \bar{X}} \bar{P}(x), \tag{5}$$

где $\bar{P}(x)$ – функция полезности решения x , представляющая собой полиномиальную скалярную многофакторную оценку частных критериев $k_j(x)$; \bar{X} – допустимое множество решений; знак «–» означает, что эти величины содержат неопределенности.

Исходными источниками неопределенности являются: неполнота знаний; невозможность точного и

полного учета реакции внешней среды (метасистемы); неточное понимание ЛПР целей системы.

Отсюда видно, что понятие «неопределенность» информации является более широким, интегрирующим по отношению к понятию «точность» данных. В связи с этим при решении задач принятия решений возникает необходимость введения некоторой метрики, в которой измеряются количественные характеристики, описывающие природу и интенсивность проявления конкретного вида неопределенности. Тогда неопределенные данные описываются парой значений, одно из которых характеризует значение переменной, а второе – природу и количественные характеристики неопределенности.

Рассмотрим проблемы оптимизации рентабельной логистической системы в условиях неопределенности [3]. Показатели прибыльности (рентабельности) позволяют дать оценку эффективности использования менеджмента его активов. Будем считать термины «рентабельность» и «прибыльность» синонимами [1, 2].

Координаты экстремума $\pi(d)$, как и любого другого критерия оптимизации, можно рассматривать как своего рода эталонные значения цены и прибыли и использовать их для оптимизации следящего режима терминального управления [5]. Общий критерий оптимизации выбираем в виде (целевая функция):

$$F_1(d, d_{opt}, \pi_{max}, g_1, g_2) = g_1 \left[\frac{\pi(d) - \pi_{max}}{\pi_{max}} \right]^2 + g_2 \left[\frac{d - d_{opt}}{d_{opt}} \right]^2, \tag{6}$$

где весовые коэффициенты g_i , $i = 1, 2$, значимости относительных отклонений реальных значений цены d и прибыли $\pi(d)$ от установок d_{opt} и $\pi_{max}(d_{opt})$ определяют с учетом условия нормировки:

$$\sum_{i=1}^2 g_i = 1. \tag{7}$$

Необходимые условия оптимизации следящего режима терминального управления удобно сформулировать в виде теоремы об оптимальном терминальном управлении в условиях неопределенности [5].

Теорема. Если для оптимизации следящего режима терминального управления в условиях неопределенности.

Используют целевую функцию (2).

Установки d_{opt} и π_{max} выбирают из условий:

$$d_{opt} = \arg \max_d \pi(d), \tag{8}$$

$$\pi_{max} = \max_d \pi(d) = \pi_{max}(d_{opt}). \tag{9}$$

Реальные значения d и $\pi(d)$ отклоняются от d_{opt} и π_{max} , т. е.

$$d \neq d_{opt}, \tag{10}$$

$$\pi(d) \neq \pi_{max}(d_{opt}), \tag{11}$$

$$\pi'(d) \neq \pi'(d_{opt}), \quad (12)$$

$$\left\{ \left[\pi'(d)^2 + \pi''(d) [\pi(d) - \pi_{max}] \right] + \frac{g_2 \pi_{max}^2}{g_1 d_{opt}^2} \right\} > 0. \quad (13)$$

При значении $d = d_1$, оптимальное решение, имеет вид:

$$d_1 = d_{opt} \left[1 - \frac{g_1 d_{opt}}{g_2 \pi_{max}} \pi'(d) \frac{\pi(d) - \pi_{max}}{\pi_{max}} \right]. \quad (14)$$

Доказательство теоремы выполняется стандартным способом – путем преобразования и решения уравнения оптимизации, которое получается дифференцированием функции (1) по d и приравниванием результата нулю. При этом, как обычно, вторая производная должна быть больше нуля при $d = d_1$ (условие 4). Можно заметить, что решение (3) является обобщением оптимального решения

$$d_{opt} = Z_1 - \frac{N(d)}{N'(d)} \quad (15)$$

уравнения оптимизации

$$\pi'(d) = N'(d)(d - Z_1) + N(d) = 0, \quad (16)$$

на случаи, когда $d \neq d_{opt}$ и $\pi(d) \neq \pi_{max}(d_{opt})$. Выражение в квадратных скобках уравнения (14) является своего рода поправкой, которая изменяет d для приведения его к d_{opt} .

Следствие 1. Задачи оптимального управления ценой по критериям $\max_d \pi(d)$ и $\min_d F_1(d)$ эквивалентны (тождественны), так как имеют общее оптимальное решение:

$$d_{opt} = \arg \max_d \pi(d) = \arg \min_d F_1(d). \quad (17)$$

Следствие 2. В реальных условиях, когда d отклоняется от d_{opt} , $\pi(d) \neq \pi_{max}$, для обеспечения $\min_d F_1(d)$ необходимо корректировать d , то есть вводить поправку в соответствии с уравнением (14).

Исследуем поведение поправки в зависимости от знака и величины отклонения d от d_{opt} .

Так как $\pi(d) - \pi_{max}(d_{opt}) < 0$ по определению, уравнение (14) удобно представить в виде:

$$d_1 = d_{opt} + \frac{g_1 d_{opt}^2 \pi'(d)}{g_2 \pi_{max}^2} [\pi_{max}(d_{opt}) - \pi(d)]. \quad (18)$$

Из уравнения (18) следует, что знак поправки полностью определяется знаком производной

$$\pi'(d) = N'(d)(d - Z_1) + N(d), \quad (19)$$

а величина поправки – величиной отклонения:

$$\Delta \pi(d) = \pi_{max}(d_{opt}) - \pi(d). \quad (20)$$

Определим область значений d , для которых $\pi'(d) < 0$ и величина $d_1 < d_{opt}$:

$$N'(d)(d - Z_1) + N(d) < 0, \quad d > Z_1 - \frac{N(d)}{N'(d)} = d_{opt}. \quad (21)$$

Следовательно, при всех значениях d , удовлетворяющих неравенству (21), производная $\pi'(d)$ будет отрицательной и значение d_1 будет меньше d_{opt} .

В том случае, когда неравенство (21) переходит в равенство, $\pi'(d) = 0$, поправка вырождается в нуль и $d_1 = d_{opt}$. В том случае, когда $\pi'(d) > 0$, значения d удовлетворяют неравенству:

$$d < Z_1 - \frac{N(d)}{N'(d)} = d_{opt}, \quad (22)$$

и значения d_1 будут больше, чем d_{opt} .

Из результатов анализа следует, что при оптимальном управлении по критерию (1) формируется стабилизирующая отрицательная обратная связь, которая обеспечивает удержание d вблизи d_{opt} . Иначе говоря, образуется оптимальный следящий режим, в котором d и $\pi(d)$ находятся вблизи значений d_{opt} и $\pi_{max}(d_{opt})$.

Пример.

Предположим, что $N(d) = N_0 e^{d/d}$, тогда

$$d_{opt} = Z_1 + d_0,$$

$$\pi_{max}(d_{opt}) = N_0 e^{-(1+Z_1/d_0)} \cdot d_0 - Z_0.$$

Пусть $d = d_{opt} \pm \Delta d$, тогда

$$\pi(d) = \pi(d_{opt} \pm \Delta d) = N_0 e^{-(1+(Z_1 \pm \Delta d)/d_0)} (d_0 \pm \Delta d) - Z_0, \quad (23)$$

$$\pi'(d) = N'(d_{opt} \pm \Delta d)(d_0 \pm \Delta d) + N(d_{opt} \pm \Delta d), \quad (24)$$

$$\Delta \pi(d) = N(d_{opt}) \left[d_0 - (d_0 \pm \Delta d) e^{\pm \frac{\Delta d}{d_0}} \right], \quad (25)$$

и величина поправки определяется выражением:

$$d_1 = Z_1 + d_0 + \frac{g_1 (Z_1 + d_0)^2 \left[N'(d_{opt} \pm \Delta d)(d_0 \pm \Delta d) + N(d_{opt} \pm \Delta d) \right]}{g_2 \left[N_0 e^{-(1+Z_1/d_0)} \cdot d_0 - Z_0 \right]^2} \times N(d_{opt}) \left[d_0 - (d_0 \pm \Delta d) e^{\pm \frac{\Delta d}{d_0}} \right]. \quad (26)$$

6. Разработка модели оптимального управления системы в условиях неопределённости

Используя уравнение (18) как операторное уравнение оптимального управления ТП по критерию F_1 (1), разработаем функциональную модель оптимального управления ТП. В качестве инструмента анализа используем программу Simulink, которая вместе с пакетом Matlab позволяет осуществлять моделирование

системы в условиях неопределенности. В данной статье графическая составляющая разработанной модели в программе Simulink не представлена.

Модель включает функциональные преобразователи, сумматоры, умножители, делители и другие устройства, реализующие в общей сложности 16 операций (рис. 1). Блок 1 формирует сигнал, пропорциональный разности $d - Z_1$, следовательно, он является сумматором со вторым инвертирующим входом, его назначение – сформировать разности двух сигналов. Блок 2 является дифференцирующим устройством, блок 3 – функциональным преобразователем, его назначение сформировать выходной сигнал $N(d)$ по входному сигналу d .

Таким образом, входным сигналом схемы служит d , а выходным – d_1 . Для работы модели необходимы сигналы-установки Z_0, Z_1, g_1, g_2 . Кроме сигналов и d_1 на устройство отображения могут быть выведены сигналы d_{opt} и π_{max} . Как обычно, основные устройства модели должны быть дополнены источниками питания и блоком управления, который обеспечивает выполнение оптимального алгоритма управления.

Рассмотрим решение уравнения оптимизации [10–12]:

$$\frac{\partial F_1(d)}{\partial d} = g_1 \left[\frac{N(d)(d - Z_1) - (Z_0 + \pi_m)}{\pi_m} \right] \times \left[\frac{N'(d)(d - Z_1) + N(d)}{\pi_m} \right] + g_2 \frac{d - d_{opt}}{d_{opt}^2} = 0. \quad (27)$$

Преобразуем это уравнение к виду функционального квадратного уравнения, используя прямое и обратное преобразование искомой переменной:

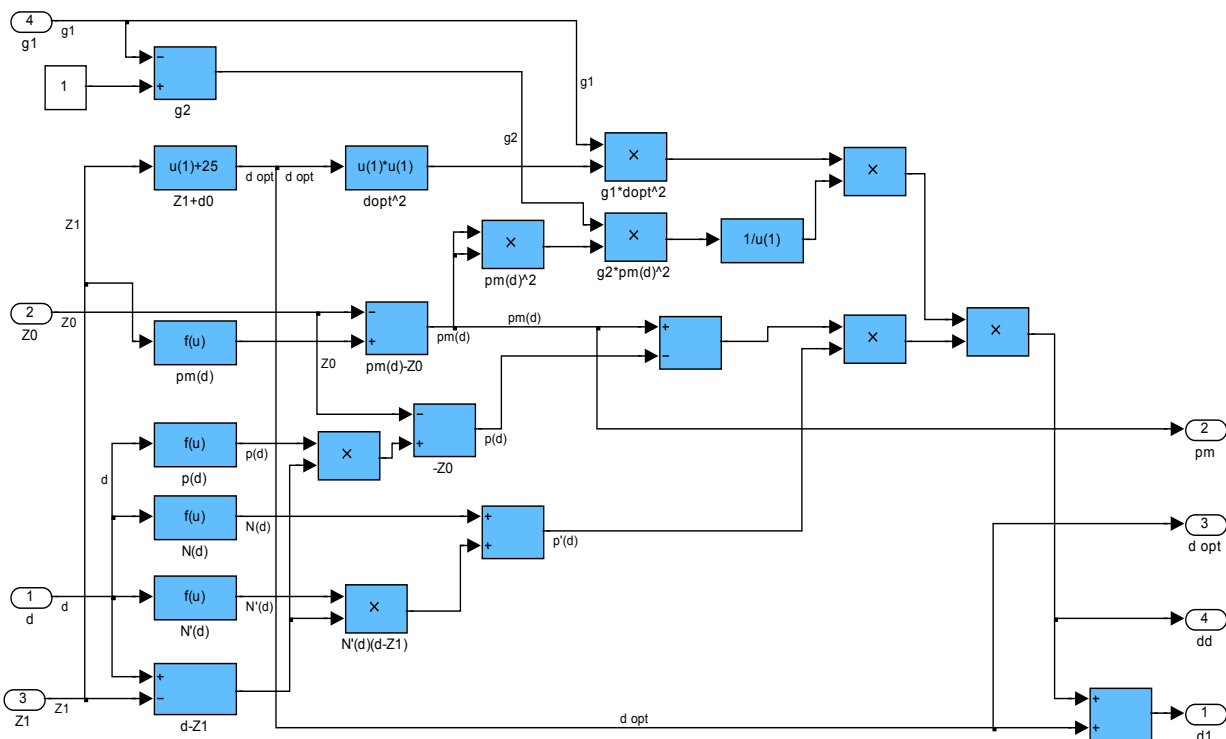


Рис. 1. Схема оптимального управления по критерию F_1

$$x = \frac{d - Z_1}{d_{opt}}, \quad d = Z_1 + d_{opt}x, \quad (28)$$

где x – безразмерная нормированная по d_{opt} переменная. В конечном итоге получим:

$$x^2 - \frac{1}{d_{opt}} \left[\frac{Z_0 + \pi_m}{N(d)} - \frac{N(d)}{N'(d)} - \frac{g_2}{g_1} \frac{\pi_m^2}{d_{opt}^2 N(d)N'(d)} \right] x - \left[\frac{Z_0 + \pi_m}{d_{opt}^2 N'(d)} + \frac{g_2}{g_1} \frac{\pi_m^2}{d_{opt}^3 N(d)N'(d)} \frac{d_{opt} - Z_1}{d_{opt}} \right] = 0. \quad (29)$$

Для решения уравнения (24) удобно ввести безразмерные коэффициенты:

$$K_1 = \frac{1}{2d_{opt}} \left[\frac{Z_0 + \pi_m}{N(d)} - \frac{N(d)}{N'(d)} - \frac{g_2}{g_1} \frac{\pi_m^2}{d_{opt}^2 N(d)N'(d)} \right], \quad (30)$$

$$K_0 = \frac{Z_0 + \pi_m}{d_{opt}^2 + N'(d)} + \frac{g_2}{g_1} \frac{\pi_m^2}{d_{opt}^3 N(d)N'(d)} \frac{d_{opt} - Z_1}{d_{opt}}. \quad (31)$$

Принципиальная трудность численной оценки заключается в том, что процесс оценивания является интеллектуальной процедурой, а, следовательно, носителями необходимой исходной информации являются люди, его реализующие, – ЛПР или эксперты. Поэтому классические методы идентификации [3, 5, 13], основанные на информации, получаемой в ходе экспериментов путем непосредственного измерения численных значений входа и выхода системы, оказываются неработоспособными и для сравнительного анализа необходимы альтернативные методы.

К альтернативным методам относятся методы коллективного экспертного оценивания и компараторной идентификации [14]. Указанные методы основаны на интроспективном подходе, заключающемся в том, что человек – носитель информации в ходе активного или пассивного эксперимента побуждается внешним наблюдателем к осознанию, структуризации, количественному оцениванию необходимой для принятия решения информации и передаче её когнитологу. В дальнейших исследованиях рассмотрим эти методы с позиции точности и нечеткой неопределенности решения задачи идентификации функции формирования скалярной многофакторной оценки полезности.

7. Выводы

1. Выбраны и обоснованы критерии оптимизации, управляемых переменных и их ограничения, созданы математические модели идентификации и методы оптимизации, определены необходимые и достаточные условия существования оптимальных решений.

2. Получены уравнения оптимизации и определены необходимые условия существования оптимального решения; сформулирована теорема о необходимых и достаточных условиях существования оптимального решения. Разработаны двух и трех параметрические модели, а также предложен критерий оптимальности и оптимальные решения. Разработан алгоритм и методика параметрической идентификации нормированного критерия оптимальности, показана эффек-

тивность параметрического анализа оптимальных решений с помощью нормированных значений прибыли, нормированных безразмерных коэффициентов и нормированных значений цены. Определены безразмерные нормированные координаты экстремумов, и границы интервала существования прибыли.

3. Выбран среднеквадратичный критерий оптимизации, в котором d , $\pi(d)$ – координаты отклонений реальных значений от эталонных подчинены условию нормирования. Сформулирована теорема об оптимальном терминальном управлении. Получено и решено уравнение оптимизации следящего режима.

4. Найдены аналитические выражения, которые позволяют решать задачу оптимального выбора весовых коэффициентов для минимизации критерия оптимизации следящего режима. Выведены аналитические соотношения, которые позволяют оценивать дисперсии случайных переменных, определяющих реальный и эталонный режим терминального управления. Полученные результаты двухэтапной оптимизации могут служить основой для построения конкретных систем оптимального управления, использующих два режима: «поиск оптимального (эталонного) значения управляемой переменной» и «слежение за этим оптимальным значением».

Полученные результаты позволяют научно обосновано ставить и решать задачи идентификации модели двухуровневого оптимального управления объемом и стоимостью логистической системы по двум наиболее важным для практических применений критериям: критерию максимальной прибыли и критерию минимальных издержек.

Литература

1. Корпоративная логистика. 300 ответов на вопросы профессионалов [Текст] / под ред. В. И. Сергеева. – М.: Инфра-М, 2004. – 967 с.
2. Сток, Д. Р. Стратегическое управление логистикой [Текст] / Д. Р. Сток, Д. М. Ламберт. – М.: ИНФРА – М, 2005. – 797 с.
3. Балашов, Е. П. Эволюционный синтез систем [Текст]: монография / Е. П. Балашов. – М.: Радио и Связь, 1985. – 328 с.
4. Раскин, Л. Г. Нечеткая математика [Текст]: монография / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.
5. Практическая энциклопедия. Логистика [Текст] / под ред. В. И. Сергеева. – М.: МЦФЭР, 2007. – 320 с.
6. Балабанов, И. Т. Финансовый анализ и планирование хозяйствующего субъекта [Текст]: монография / И. Т. Балабанов. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 300 с.
7. Аріон, О. В. Організація транспортного обслуговування туристів [Текст]: навч. пос. / О. В. Аріон. – К.: Альтерпрес, 2008. – 192 с.
8. Паладич, Л. Морские круизы (Морской туризм) [Текст] / Л. Паладич. – М.: Знание, 1989. – 64 с.
9. Никифорова, Е. С. Метод регрессионного анализа [Текст]: тр. МЭИ / Е. С. Никифорова; под ред. Э. К. Лецкого, Н. И. Челнокова // Планирование эксперимента (алгоритмы на языке Алгол-60). – 1970. – Вып. 76.
10. Efroymson, M. A. Multiple regression analysis [Text] / M. A. Efroymson; A. Ralston, H. S. Wilf (Eds.). – Mathematical Methods for Digital Computer., Wley, New York, 1960.
11. Черный, С. Г. Разработка сегментов кластеров координации отраслевой направленности [Текст] / С. Г. Черный, Н. А. Логунова // Мир транспорта. – 2014. – № 3 (52). – С. 104–115.
12. Chernyi, S. The implementation of technology of multi-user client-server applications for systems of decision making support [Text] / S. Chernyi // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 3. – P. 60–65
13. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – Vol. 44, Issue 7. – P. 34–48. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40
14. Логунова, Н. А. Моделирование процессов развития сложных структур на примере морской отрасли [Text] / Н. А. Логунова, С. Г. Черный, А. Ю. Семенова, И. В. Антипенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 6, № 2 (78). – С. 36–46. doi: 10.15587/1729-4061.2015.56030
15. Hatcher, W. S. The Logical Foundations of Mathematics .A volume in Foundations and Philosophy of Science and Technology Series [Text] / W. S. Hatcher, M. Bunge. – Elsevier Ltd., 1982.