

Автоматизация и Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор
В.Л. Белоусов

РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:
Бучаченко А.Л.
Гусев А.А.
Дегтярев Ю.И.
Елисеев В.А.
Иванов А.П.
Мальцева С.В.
Нефедов Е.И.
Шебалин И.Ю.
(заместитель главного редактора)

2
—
2013

УЧРЕДИТЕЛИ:
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НАУЧНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ
ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ

Журнал зарегистрирован 9 апреля
1999 г. за № 018684 в Комитете
Российской Федерации по печати

Журнал входит в перечень
утверждённых ВАК РФ изданий
для публикации трудов соискателей
учёных степеней

ООО «Издательство Машиностроение»

РЕДАКЦИЯ:
Шебалин И.Ю. — зам. главного редактора
Осипова В.Г. — научный редактор
Богус С.В. — секретарь

Адрес редакции:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4
Тел.: (499) 748 0290,
E-mail: ast@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4
Тел.: (499) 268 3858,
факс: (499) 269 4897

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Либерман Я.Л., Летнев К.Ю. Система цифрового управления разгоном–торможением следящего привода	3
Набатников Ю.Ф. Моделирование сборки соединений деталей машин на ЭВМ	6

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Юрин А.Ю., Малтугуева Г.С. Обоснование мероприятий по предотвращению повторных отказов на основе precedентов и методов группового выбора	16
Щербань И.В., Щербань О.Г., Конев Д.С. Обобщённая модель подвижного объекта для реализации тесной интеграции разнородных навигационных систем	24
Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Кэ Фан, Ким Чжесу. Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов	30
Шемелин В.К., Филипенков А.В. Повышение достоверности диспетчерско-технологической информации по расходу газа с применением регрессионного анализа ...	35
Летовалыцев В.И. Алгоритмы формализации и интерпретации смысла текста на основе формальной семантики ...	38
Аникеев Е.А., Фёдоров Н.Ю., Черкасов О.Н. Алгоритм поиска маршрута в транспортной сети с учётом вероятностных характеристик времени движения	44

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов	48
-----------------------------	----

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

Lberman Ya.L., Letnev K.Yu. Servo drives digital acceleration/deceleration control system	3
Nabatnikov Yu.F. Assembly modeling of the machines details connections through the use of the computer	6

MODERN TECHNOLOGIES

Yurin A.Yu., Maltugueva G.S. Actions substantiation for repeated failure prevention on the basis of precedents and group choice methods	16
Shcherban I.V., Shcherban O.G., Konev D.S. The mobile object generalized model for realization of the heterogeneous navigation systems close integration	24
Neusyipin K.A., Proletarskiy A.V., Ke Fan, Kim Chzesu. Correction methods of unmanned aircraft navigation systems	30
Shemelin V.K., Filipenkov A.V. Reliability increase of dispatching and technological information relative to gas consumption with the regression analysis application	35
Letovaltsev V.I. Text sense formalization and interpretation algorithms on the basis of formal semantics	38
Anikeev E.A., Fedorov N.Yu., Cherkasov O.N. Route search algorithm in a transport network by taking into account the movement time probabilistic characteristics	44

SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review	48
--------------------------	----

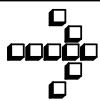
Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Роспечать» — 70537, по каталогу «Пресса России» — 27838, по «Каталогу российской прессы «Почта России» — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу: (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 6600, 269 5298

Сдано в набор 30.11.12. Подписано в печать 28.01.13.
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная

Отпечатано в ООО «Белый ветер»
115407, Москва, Нагатинская наб., 54

**Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация и современные технологии» обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель**

**ООО «Издательство Машиностроение»,
«Автоматизация и современные технологии», 2013 г.**



УДК 629.062

Я.Л. Либерман, проф. ЮНЕСКО, К.Ю. Летнев (Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

ptmir@inbox.ru

СИСТЕМА ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗГОНОМ-ТОРМОЖЕНИЕМ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

Предложена система управления разгоном-торможением следящих приводов машин. Основным её блоком является электронный контроллер типа микро-ЭВМ. Рассмотрено специализированное программное обеспечение системы, базирующееся на оптимальности разгона-торможения привода по закону кубической параболы, аппроксимированной тремя отрезками прямых. Приведены сведения о порядке настройки системы при использовании её совместно с различными приводами.

Ключевые слова: следящий привод, контроллер, система управления, разгон-торможение.

A machines servo drives digital acceleration/deceleration control system is proposed. This system main unit is an electronic microcomputer-based controller. The system special-purpose software, which is based on the drive acceleration/deceleration optimality in accordance with cubical parabola law approximated by three straight-line segments is considered. Information about system setting order at jointly utilization with various servo drives is adduced.

Key words: servo-drive, controller, control system, acceleration/deceleration.

Всякая система управления приводом машины, как известно, состоит из двух частей: собственно привода и устройства управления им. Первая – обычно, двигатель со стабилизатором скорости, аппаратурой защиты и т. п. Вторая – командааппарат или контроллер. Последний в большинстве случаев представляет собой устройство, обеспечивающее плавные разгон и торможение привода при его пуске и останове, и в зависимости от типа привода, выполняется по-разному. В случае релейных приводов контроллеры строятся на специальных реле: токовых, напряжения, времени и др. Реле, и в частности реле времени, используются разные: маятниковые, электромагнитные, моторные, но все они, даже те из них, что обеспечивают многоступенчатые разгон и торможение, для следящих приводов неприемлемы. Причина в том, что следящие приводы управляются, как правило, аналоговым или высокодискретным сигналом, а контроллеры на реле формируют низкодискретные команды. Для того, чтобы получить аналоговый или «практически аналоговый» высокодискретный сигнал, в настоящее время разрабатываются электронные контроллеры, причем ориентируются они при этом на вполне конкретные приводы. Создаются и контроллеры типа управляющих микро-ЭВМ. В та-

ком случае системы управления приводом получаются цифровыми (рис. 1) и могут реализовывать практически любой закон разгона-торможения. Для этого их обычно снабжают широкониверсальным программным обеспечением. Но широкая универсальность приводит к тому, что требуемый закон управления каждым конкретным приводом приходится задавать путём ввода в контроллер довольно большого числа исходных данных, что неудобно и трудоёмко. Количество исходных данных, однако, можно сократить, если использовать не широкониверсальное, а специализированное программное обеспечение контроллера, ориентированное на формирование сигнала, изменяющегося не по любому, а по некоторому одному, но оптимальному закону. Основываясь на этом, на кафедре «Подъёмно-транспортные машины и роботы» УрФУ разработали компьютерную систему, отличающуюся от существующих как простотой настройки, так и удобством эксплуатации [1].

Программное обеспечение системы базируется на известном представлении об оптимальности разгона-торможения привода машины по закону кубической параболы, аппроксимированному отрезками прямых [2], и реализуется на языке C++.

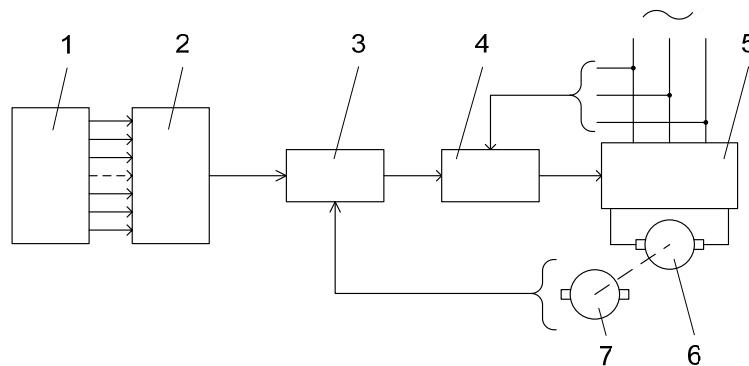


Рис. 1. Структура цифровой системы управления следящим приводом:

1 – микро-ЭВМ с параллельным портом; 2 – цифроаналоговый преобразователь; 3 – регулятор напряжения; 4 – блок импульсно-фазового управления тиристорами; 5 – тиристорный преобразователь напряжения; 6 – двигатель, например, постоянного тока; 7 – тахогенератор

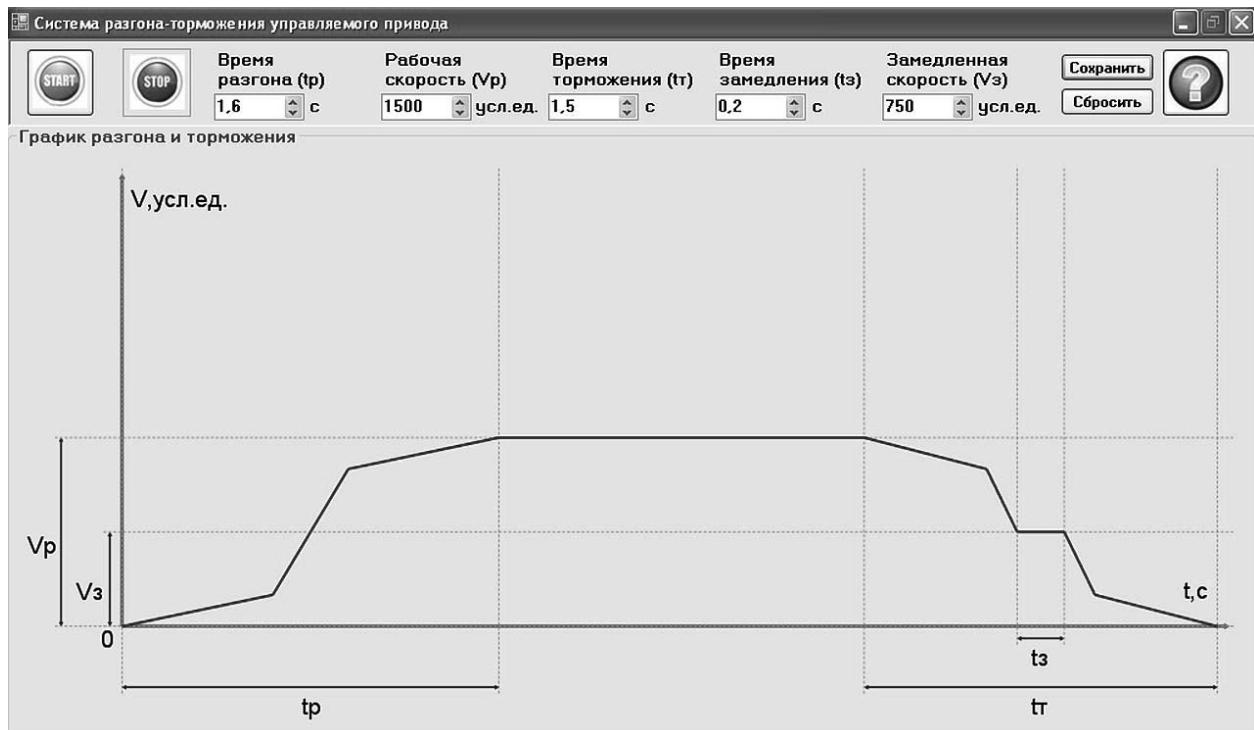


Рис. 2. Главное окно системы

На рис. 2 показано главное окно системы. Как видно из рисунка, период (стадия) разгона привода t_p до рабочей скорости V_p аппроксимируется тремя отрезками. Период (стадия) торможения t_T – четырьмя, один из которых соответствует замедленной по сравнению с V_p скорости V_3 . Продолжительность работы привода на скорости V_3 задается числом t_3 , момент начала разгона – командой «Start», начало торможения – командой «Stop». Числа t_p , t_T , t_3 , V_p и V_3 вводятся в систему при её наладке, для чего в окне предусмотрены специальные зоны. При этом отрезок, соотвествующий

вующий V_3 , если потребуется, может быть исключён.

На рис. 3 приведён алгоритм работы системы. Он включает в себя две группы блоков – настроочные (обозначены цифрами 1–8) и рабочие (все остальные). С помощью настроочных блоков в программе в общем виде зафиксированы параметры отрезков, аппроксимирующих кубическую параболу. При установке программы в контроллер эти блоки позволяют откорректировать форму параболы с учётом специфических особенностей управляемого привода и машины, в которой

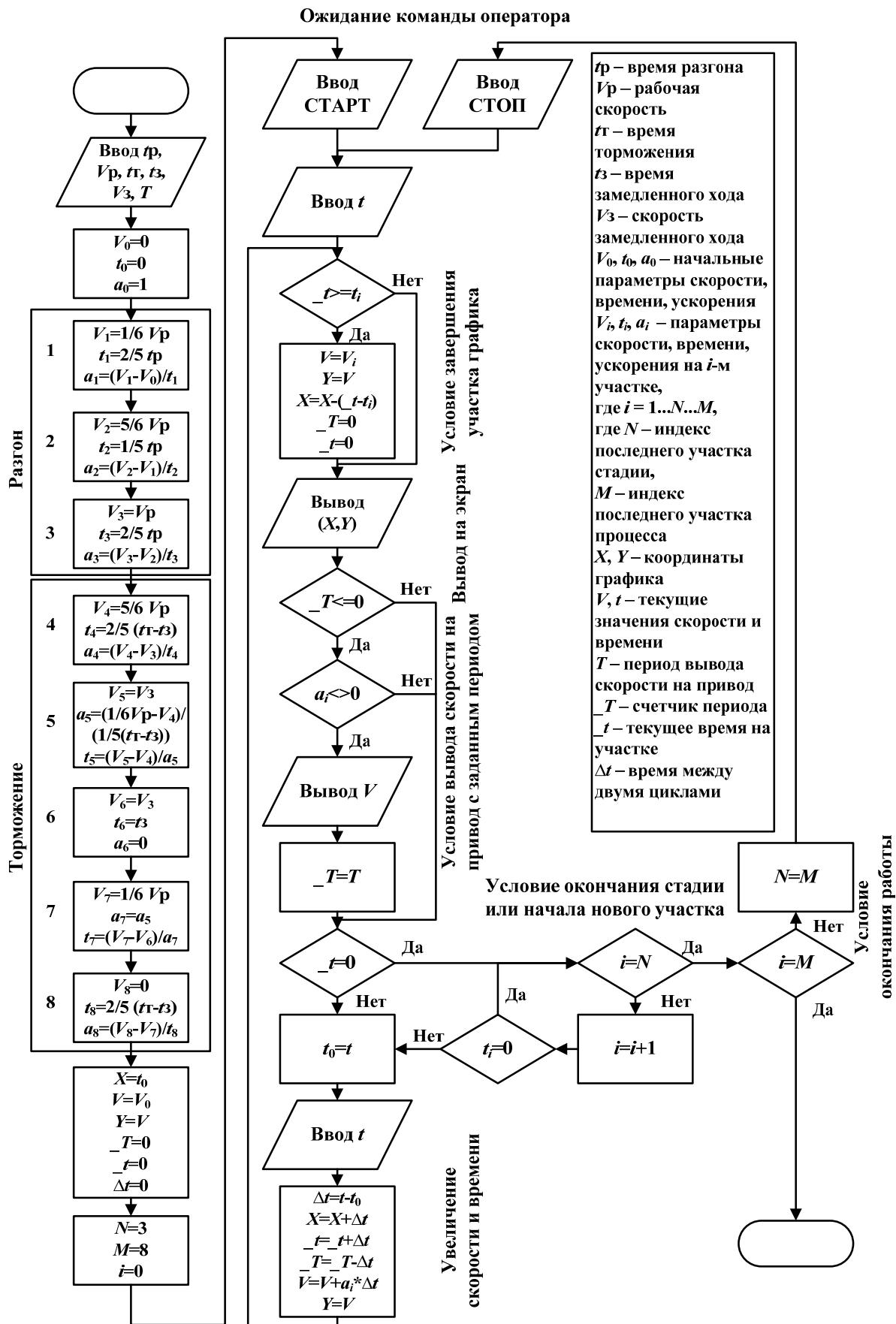


Рис. 3. Алгоритм управления разгоном-торможением привода

он применён (моментов инерции элементов привода и машины, кинематической структуры машины и т. п.). Рабочие же блоки позволяют вычислять в реальном масштабе времени текущие значения скорости V , подлежащие выводу на ЦАП и отображению в главном окне системы.

Работа с системой осуществляется следующим образом. Перед первым запуском привода оператор должен нажать в главном окне кнопку «Сбросить», затем ему следует ввести требуемые значения t_p , V_p , t_T и, если есть необходимость, — t_3 и V_3 . После этого он должен нажать кнопку «Сохранить», чем подготовка контроллера к непосредственному управлению приводом завершается. Для разгона привода оператору следует нажать кнопку «Start». Контроллер начинает выдавать кодированный сигнал V , который выдаётся на ЦАП, а затем на привод, и прорисовывает в главном окне системы график изменения V при разгоне. Завершив разгон, контроллер выдает фиксиро-

ванное значение V_p сколь угодно длительное время. При необходимости торможения привода оператор нажимает кнопку «Stop», что влечёт за собой снижение V_p до нуля и прорисовывание графика заданного изменения V при торможении. Для повторения цикла оператору достаточно нажать «Start», а затем, когда потребуется, — «Stop».

Описанное программное обеспечение может быть использовано в программируемых контроллерах на микро-ЭВМ практически любых типов. Оно работает надёжно и пригодно для управления бесступенчатыми приводами различного вида и назначения.

Библиографические ссылки

1. Либерман Я.Л., Летнев К.Ю. Система разгона-торможения управляемого привода (Скорость). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616813 от 01.09.2011.

2. Ратмиров В.А. Управление станками гибких производственных систем. М.: Машиностроение, 1972. 272 с.

УДК 621 – 2.002.2; 621.81.002.2

Ю.Ф. Набатников, канд. техн. наук, проф. (Московский государственный горный университет)

kaftmr@msmu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ЭВМ

Рассмотрены вопросы моделирования сборки соединений деталей машин на ЭВМ. Программный комплекс позволяет моделировать сборку соединений в соответствии с основными методами обеспечения точности. Математическим моделированием определены параметры селективной сборки, обеспечивающие повышение точности соединений на один и два квалитета в условиях мелкосерийного производства при вероятности образования незавершённого производства, равной или близкой к нулю.

Ключевые слова: детали машин, соединения, точность, сборка, взаимозаменяемость, моделирование, ЭВМ.

Assembly modeling questions of the machines details connections through the use of the computer are considered. The program complex allows to model of the assembly connections in accordance with the basic methods of the accuracy ensuring. Mathematical modeling defined the selective assembly parameters providing connections accuracy increase on one and two classes of accuracy in the conditions of small-scale production at probability of the unaccomplished production formation, equal or close to zero.

Key words: machine details, connections, accuracy, assembly, interchangeability, modeling, computer.

При проектировании и внедрении технологических процессов изготовления и сборки деталей машин очень важно, как можно ближе к реальным условиям производства, рассчитать параметры и уровень качества соединений. В производственных условиях для определения фактических зазоров (натягов) в соединениях отверстий с валами необходимо организовать опытное произ-

водство, изготовить детали соединений в соответствии с заданной точностью, зафиксировать действительные размеры сопрягаемых поверхностей, собрать по определённому методу достижения точности соединения, зафиксировать в них зазоры, определить количество отбракованных соединений и объём незавершённого производства. Всё это требует существенных материальных,

трудовых и финансовых затрат. Кроме того, при изменении параметров точности соединений и их элементов, технологии изготовления и метода сборки все перечисленные работы необходимо выполнить заново.

В качестве альтернативы для решения данной задачи предложен метод математического моделирования сборки соединений на ЭВМ. В своей основе метод имеет известное положение о том, что значения отклонений размеров деталей при изготовлении подчиняются определённым закономерностям. В общем случае вид и характер распределений могут быть различными. Однако для разработки метода математического моделирования это не имеет значения. Принципиальной является лишь объективность существования этих закономерностей в реальных производственных условиях.

Вид распределений зависит от состояния и уровня организации конкретных производств. Так, при единичном и мелкосерийном производстве считается, что отклонения размеров распределяются по закону равной вероятности. Это значит, что при увеличении количества обрабатываемых деталей отсутствует тенденция группирования отклонений размеров в области некоторого среднего значения, а появление определённого отклонения из интервала значений, заданных полем допуска, равновероятно с другими значениями. В этом случае рассеяние размеров зависит только от переменных систематических погрешностей. По закону равной вероятности распределены размеры повышенной точности (5–6-е квалитеты и выше). Из-за узких границ допуска на размер вероятность попадания его в различные размерные группы становится одинаковой (Маталин А.А. Технология машиностроения. СПб.: Лань. 2008. 512 с.).

При крупносерийном и массовом производстве действительные размеры деталей распределяются, как правило, по нормальному закону. На настроенном металорежущем оборудовании суммарная погрешность обработки формируется

в результате воздействия множества случайных факторов, зависящих от состояния станка, инструмента, заготовки и приспособления. Погрешности обработки от действия этих факторов являются независимыми друг от друга случайными величинами одного порядка. Из теории вероятностей известно, что распределение суммы большого числа взаимно независимых случайных величин подчиняется закону нормального распределения. Распределение отклонений размеров по закону Гаусса (в большинстве случаев) имеет место при точности изготовления по 8–10-му и более грубым квалитетам.

В условиях среднесерийного производства распределение отклонений размеров, как правило, подчиняется закону Симпсона (треугольника). Кроме того, распределение отклонений размеров по этому закону наблюдается в большинстве случаев при обработке заготовок по 7–8-му квалитетам точности, а в некоторых случаях и по 6-му.

Если законы распределения отклонений размеров отверстия и вала неизвестны, то их можно установить по результатам измерений, построив эмпирическую функцию распределения и эмпирическую интегральную функцию распределения (кумулятивную кривую). При этом по оси x откладывают границы интервалов отклонений размеров и подбирают аппроксимирующую функцию для всей кумулятивной кривой или отдельных её участков (рис. 1).

Законы распределения отклонений размеров валов и отверстий, как правило, несимметричны. При изготовлении валов центр группирования размеров обычно смещается в сторону исправимого брака, т. е. в сторону больших валов, а при изготовлении отверстий – в сторону меньших значений. Такое смещение характеризуется коэффициентом относительной асимметрии α , который определяет смещение действительного центра группирования отклонений размеров $M_{o(x)}$ от математического ожидания $M_{(x)}$ (рис. 2). В производственных условиях коэффициент α может

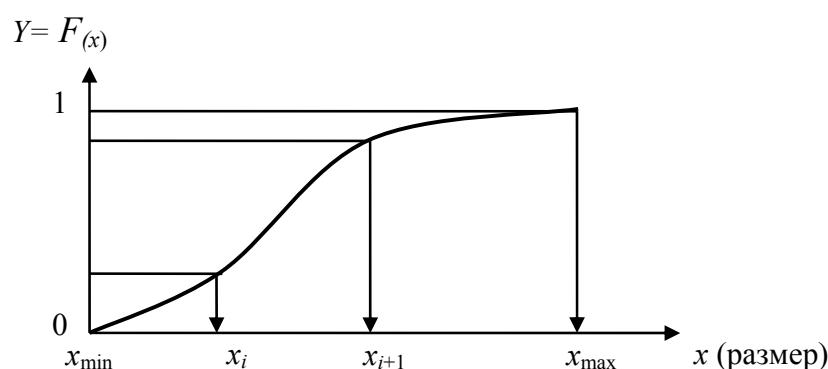


Рис. 1. Кумулятивная кривая

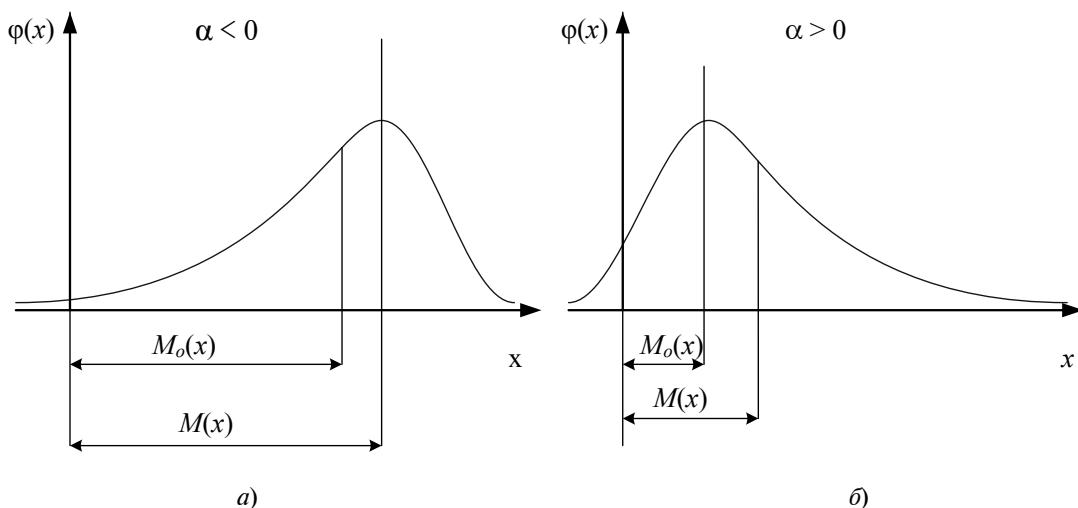


Рис. 2. Распределение плотности вероятности при различных коэффициентах относительной асимметрии:
а – валы; б – отверстия

изменяться в пределах $-0,5 \leq \alpha_0 \leq 0$ для отверстий и $0,5 \leq \alpha_B \leq 0$ для валов.

Рассмотрим возможность использования зависимостей для моделирования сборки соединений деталей машин на ЭВМ. При построении графика интегральной функции любого распределения по оси y откладывается вероятность реализации отклонения размера $F_{(x)}$, а по оси x – значение отклонения размера x_i . Взаимосвязь x и y обеспечивается кривой распределения. Поэтому для моделирования необходимо случайным образом получить число из интервала значений от 0 до 1, которое является вероятностью реализации определённого размера $F_{(xi)}$, и по кривой распределения определить величину отклонения размера x_i . Повторив данную операцию в соответствии с количеством обрабатываемых деталей, получим массив отклонений размеров деталей.

Таким образом, для моделирования отклонений размеров на ЭВМ необходимо иметь датчик, который генерирует случайные числа, лежащие в пределах от 0 до 1. Причём вероятности появления любых чисел из данного интервала должны быть равны друг другу. Этому требованию отвечает равномерный закон распределения. Функции такого датчика случайных чисел в современных программных средствах выполняет оператор RND .

Для основных законов распределения вычисление отклонений размеров x_i можно проводить по следующим уравнениям:

при равномерном распределении

$$x_i = (x_{\max} - x_{\min}) RND(1) + x_{\min} + \alpha \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{2},$$

где x_{\max} , x_{\min} – предельные отклонения размера; α – коэффициент относительной асимметрии;

при законе Симпсона

$$x_i = (x_{\max} - x_{\min}) \frac{[RND(1) + RND(1)]}{2} + x_{\min} + \alpha \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{2};$$

при нормальном законе

$$x_i = \left(\frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \right) + \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{6} S + \alpha \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{2}.$$

Параметр S определяется по формуле

$$S = g - 6,$$

$$\text{где } g = \sum_{i=1}^{12} RND(1).$$

В основе расчёта g лежит положение о том, что сумма 12 случайных чисел, распределённых по закону равной вероятности, является нормально распределённой случайной величиной.

Задавшись определённым законом распределения отклонений размеров отверстий и законом распределения отклонений размеров валов, а также значениями предельных отклонений размеров, можно моделировать на ЭВМ их значения. В результате моделирования получим отклонения размеров сопрягаемых поверхностей после их «изготовления» в соответствии с заданными кон-

структуром полями допусков. Далее моделируется процесс сборки соединений в зависимости от метода достижения точности, и определяются зазоры (натяги) в соединениях. Так, при использовании метода полной взаимозаменяемости из соответствующих массивов случайным образом выбираются отклонения размеров деталей, рассчитываются и формируются массивы зазоров (натягов) в соединениях.

При сборке соединений методом селективной сборки поля допусков отклонений размеров отверстия и вала делятся на соответствующие группы, определяются их размерные границы, осуществляется селективная сборка и рассчитывается объём незавершённого производства.

Для реализации рассмотренного метода разработан комплекс программ моделирования отклонений размеров и зазоров (натягов) в соединениях деталей машин. Изменяя исходные данные, можно оперативно получить с ЭВМ не только величину зазоров (натягов) в соединениях и уровни их качества, но и оценить и исследовать влияние изменения различных параметров на конечные результаты, что создаёт предпосылки оптимизации конструктивных и технологических решений.

Программный комплекс универсален и позволяет моделировать все основные методы обеспечения точности в соединениях. Алгоритм про-

граммы соответствует расчётным зависимостям метода межгрупповой взаимозаменяемости, так как методы полной и групповой взаимозаменяемости являются его частными случаями.

Исходными данными для моделирования являются (рис. 3): количество соединений в партии ($n_{ш}$); нижнее (EIA) и верхнее (ESA) предельные отклонения размеров отверстий; нижнее (eib) и верхнее (esb) предельные отклонения размеров валов; законы распределения отклонений размеров отверстий и валов (N_{3B} , N_{30}); коэффициенты относительной асимметрии для законов распределения отклонений размеров отверстий (α_o) и валов (α_b); максимально допустимый (S_{max}) и минимально допустимый (S_{min}) зазоры (натяги) в соединениях; групповые допуски для отклонений размеров отверстий (a) и валов (b); количество селективных групп для отклонений размеров отверстий ($n1$) и валов ($n2$).

Моделирование сборки соединений осуществляется по следующему алгоритму:

по заданным предельным отклонениям размеров отверстий и валов и величинам групповых допусков определяются границы селективных групп для отверстий и валов;

по заданным предельным отклонениям и законам распределения отклонений размеров отверстий и валов моделируются их значения и формируются массивы отклонений размеров;

Параметр	Отверстие	Вал
Закон распределения: 1-нормальный; 2-Симпсона; 3-равномерный	1	1
Нижнее предельное отклонение, мкм	0	-175
Верхнее предельное отклонение, мкм	300	125
Длина интервала, мкм	25	25
Количество интервалов	12	12
Количество соединений	200	200
Асимметрия	-0.300	0.3
S_{max}, S_{min}	200	50
<input type="button" value="Вычислить"/>		
<input type="button" value="Посмотреть результаты распределения размеров"/>		<input type="button" value="Распределение зазоров"/>

Рис. 3. Шаблон для ввода исходных данных

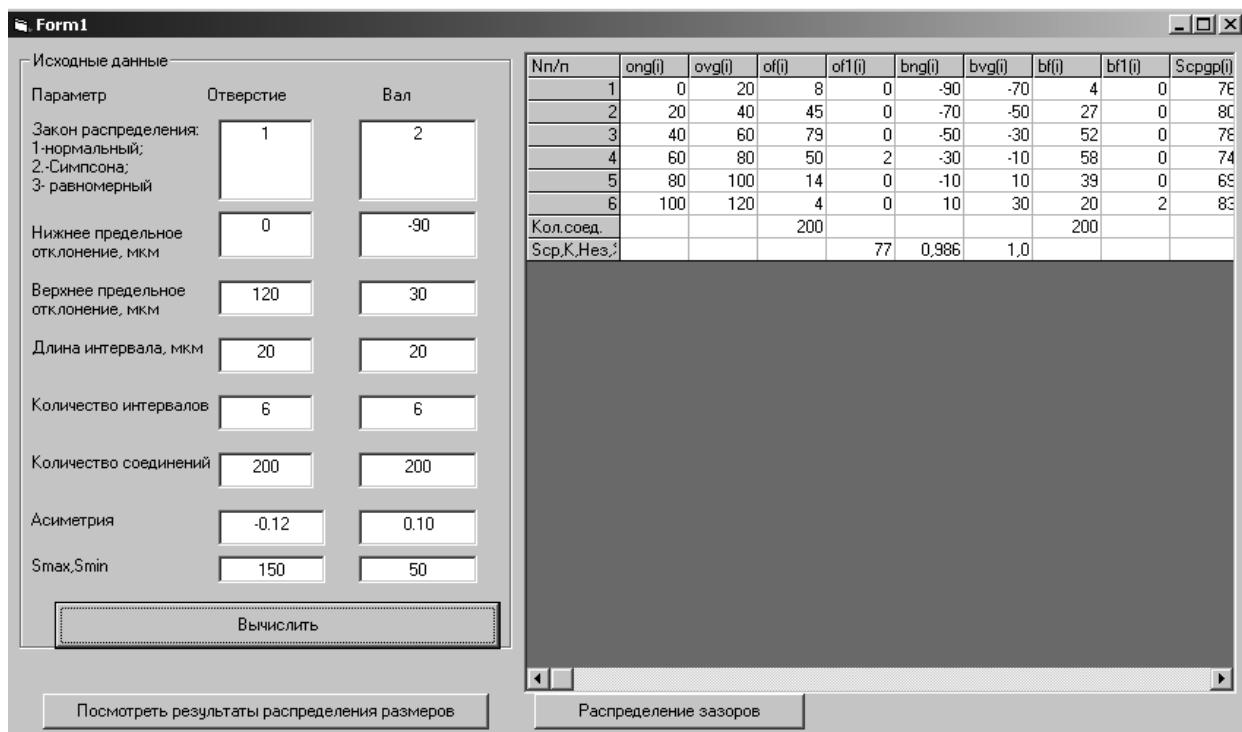


Рис. 4. Результаты моделирования

определяется принадлежность отклонений размеров к соответствующим селективным группам. Формируются массивы отклонений размеров отверстий и валов, отсортированные по соответствующим селективным группам;

рассчитывается схема комплектации отверстий валами, при которой величины зазоров (натягов) в соединениях не выходят за предельно допустимые значения;

из соответствующих селективных групп случайным образом выбираются отклонения размеров отверстий и валов и определяются зазоры (натяги) в их соединениях. Формируется массив зазоров (натягов);

по количеству некомплектных соединений определяется объём незавершённого производства по каждой селективной группе отверстий и валов;

определяется средний зазор (натяг) в соединениях, средний уровень качества сборки и общий объём незавершённого производства. Оформляются расчётные данные.

Исходные данные вводятся с экрана дисплея по соответствующему шаблону (см. рис. 3). Результаты моделирования представляются пользователю в табличной форме и графическом виде. Расчёты данные включают:

границы селективных групп для отверстий (рис. 4, onq(i) – нижняя, ovq(i) – верхняя) и валов (рис. 4, bnq(i) – нижняя, bvq(i) – верхняя);

распределение отклонений размеров валов (рис. 4, bf(i)) и цилиндров (рис. 4, of(i)) по селективным группам;

групповые зазоры (натяги) в соединениях (рис. 4, Scpqp(i));

количество некомплектных отверстий (рис. 4, of1(i)) и валов (рис. 4, bf1(i)) по селективным группам;

средний зазор (натяг) в соединениях (рис. 4, S_{cp}) и средний уровень качества соединений (рис. 4, K);

объём незавершённого производства (рис. 4, Нез,%);

распределение зазоров (натягов) по их величине в количественном выражении (рис. 5, pacz(i)) и в процентах от общего количества соединений (рис. 5, pacz1(i));

распределение соединений по уровню качества в количественном выражении (рис. 5, pack(i)) и в процентах от общего количества соединений (рис. 5, pack1(i));

отклонения размеров валов и отверстий (рис. 6, Form 2).

В результате исследований, проведённых с использованием математического моделирования метода межгрупповой взаимозаменяемости на ЭВМ, установлены параметры селективной сборки, обеспечивающие повышение точности соединений деталей машин на один (табл. 1 и 2) и два квалитета (табл. 3 и 4) в мелкосерийном производстве.

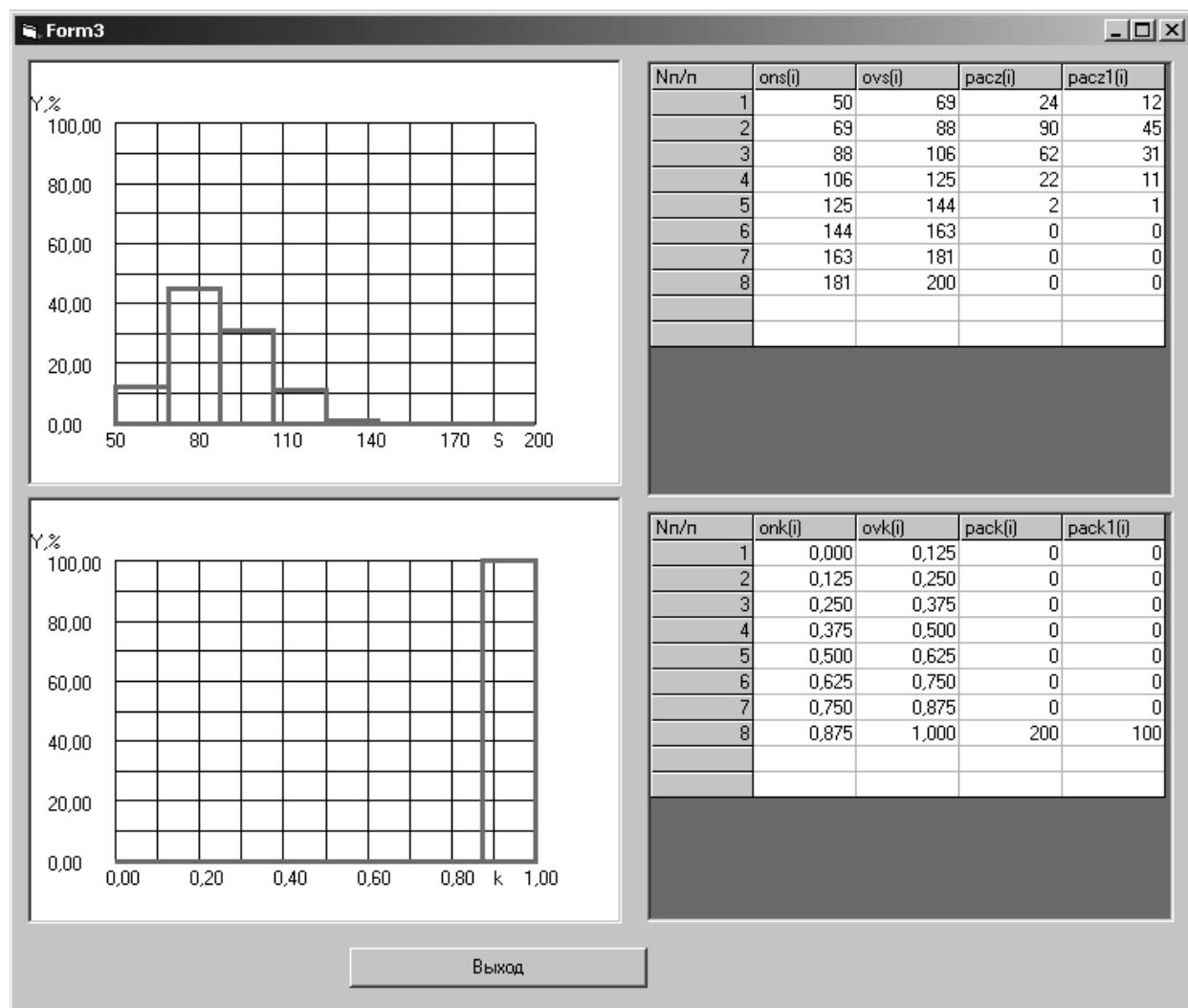


Рис. 5. Результаты моделирования. Распределение соединений по зазорам и уровню качества

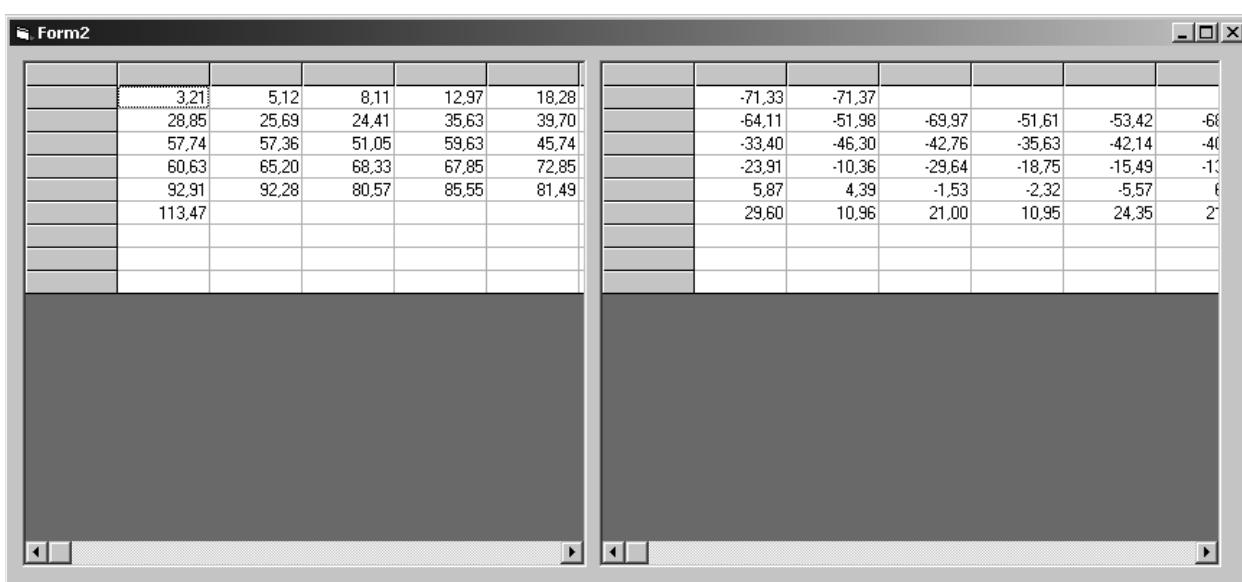


Рис. 6. Результаты моделирования. Отклонения размеров отверстий и валов

Таблица 1

Параметры сборки соединений методом межгрупповой взаимозаменяемости, обеспечивающие повышение точности на один квалитет без образования и накопления некомплектных деталей.

Однотипные законы распределения отклонений размеров отверстий и валов

№ п/п	Групповой допуск для отклонений размеров отверстий (a) и валов (b); $a = b$	Нижнее предельное отклонение размеров вала (eib)	Количество размерных групп для деталей типа «отверстие» (n_1) и «вал» (n_2); $n_1 = n_2$	Коэффициенты относительной асимметрии для законов распределения отклонений размеров		Средний зазор в соединениях (в % от среднего заданного значения)
				для деталей типа «отверстие»	для деталей типа «вал»	
1	$a = b = ITS/3$ <i>ITS – допуск на величину зазора в соеди- нении</i>	$eib = -S_{\max} + a$	3	-0,5	от 0 до +0,3	93
				-0,4	от 0 до +0,4	94
				-0,3	от 0 до +0,5	96
				-0,2	от 0 до +0,5	100
				-0,1	от 0,1 до +0,5	102
				0	от 0,3 до +0,5	103
2	$a = b = ITS/4$	$eib = -S_{\max} + 2a$	4	-0,3	от 0 до +0,3	80
				-0,2	от 0 до +0,4	82
				-0,1	от 0 до +0,4	86
				0	от 0 до +0,5	90
3	$a = b = ITS/5$	$Eib = -S_{\max} + 2a$	5	-0,5	от 0 до +0,5	80
				-0,4	от 0 до +0,5	84
				-0,3	от 0 до +0,5	880
				-0,2	от 0 до +0,5	92
				-0,1	от 0 до +0,5	96
				0	от 0 до +0,5	101

Таблица 2

Параметры сборки соединений методом межгрупповой взаимозаменяемости, обеспечивающие повышение точности на один квалитет без образования и накопления некомплектных деталей.

Разнотипные законы распределения отклонений размеров отверстий и валов

№ п/п	Групповой допуск для отклонений размеров отверстий (a) и валов (b); $a = b$	Нижнее предельное отклонение размеров вала (eib)	Количество размерных групп для деталей типа «отверстие» (n_1) и «вал» (n_2); $n_1 = n_2$	Коэффициенты относительной асимметрии для законов распре- деления отклонений размеров		Средний зазор в соединениях (в % от среднего заданного значения)
				для деталей типа «отвер- стие»	для деталей типа «вал»	
1	$a = b = ITS/3$	$eib = -S_{\max} + a$	3	-0,4	от 0 до +0,3	99
				-0,3	от 0 до +0,5	101
				-0,2	от 0 до +0,5	105
				-0,1	от 0,2 до +0,5	110
				0	+0,5	108
2	$a = b = ITS/4$	$eib = -S_{\max} + 2a$	4	-0,2	от 0 до +0,5	86
				-0,1	от 0 до +0,5	90
				0	от 0 до +0,5	94
3	$a = b = ITS/5$	$eib = -S_{\max} + 2a$	5	-0,5	от 0 до +0,5	85
				-0,4	от 0 до +0,5	89
				-0,3	от 0 до +0,5	93
				-0,2	от 0 до +0,5	97
				-0,1	от 0 до +0,5	102
				0	от 0 до +0,5	106

Таблица 3

Параметры сборки соединений методом межгрупповой взаимозаменяемости, обеспечивающие повышение точности на два квалитета без образования и накопления некомплектных деталей.
Однотипные законы распределения отклонений размеров отверстий и валов

№ п/п	Групповой допуск для отклонений раз- меров отверстий (a) и валов (b); $a = b$	Нижнее предельное отклонение размеров вала (eib)	Количество размерных групп для деталей типа «отверстие» (n_1) и «вал» (n_2); $n_1 = n_2$	Коэффициенты относительной асимметрии для законов распреде- ления отклонений размеров		Средний зазор в соединении (в % от среднего заданного значения)
				для деталей типа «отверстие»	для деталей типа «вал»	
1	$a = b = ITS/3$	$eib = -S_{\max} + a$	4	-0,4	0	95
				-0,3	от 0 до +0,1	98
				-0,2	от 0 до +0,2	100
				-0,1	от 0,1 до +0,3	100
				0	от 0,2 до +0,5	98
2	$a = b = ITS/4$	$eib = -S_{\max} + a$	5	-0,5	от 0 до +0,3	91
				-0,4	от 0 до +0,4	93
				-0,3	от 0 до +0,5	95
				-0,2	от 0 до +0,5	100
				-0,1	от 0,1 до +0,5	103
				0	от 0,2 до +0,5	107
3	$a = b = ITS/5$	$eib = -S_{\max} + a$	6	-0,5	от 0 до +0,5	91
				-0,4	от 0 до +0,5	95
				-0,3	от 0 до +0,5	100
				-0,2	от 0 до +0,5	105
				-0,1	от 0,1 до +0,5	108
				0	от 0,3 до +0,5	109
4	$a = b = ITS/6$	$eib = -S_{\max} + 2a$	8	-0,5	от 0 до +0,3	82
				-0,4	от 0 до +0,4	84
				-0,3	от 0 до +0,5	87
				-0,2	от 0 до +0,5	93
				-0,1	от 0 до +0,5	97
				0	от 0 до +0,5	103
5	$a = b = ITS/8$	$eib = -S_{\max} + 3a$	10	-0,5	от 0 до +0,3	78
				-0,4	от 0 до +0,4	80
				-0,3	от 0 до +0,5	83
				-0,2	от 0 до +0,5	88
				-0,1	от 0 до +0,5	94
				0	от 0 до +0,5	99
6	$a = b = ITS/10$	$eib = -S_{\max} + 3a$	13	-0,5	от 0 до +0,5	81
				-0,4	от 0 до +0,5	85
				-0,3	от 0 до +0,5	90
				-0,2	от 0 до +0,5	96
				-0,1	от 0 до +0,5	101
				0	от 0 до +0,5	107

Таблица 4

Параметры сборки соединений методом межгрупповой взаимозаменяемости, обеспечивающие повышение точности на два квалитета без образования и накопления некомплектных деталей.
Разнотипные законы распределения отклонений размеров отверстий и валов

№ п/п	Групповой допуск для отклонения размеров от- верстий (a) и валов (b); $a = b$	Нижнее предельное отклонение размеров вала (eib)	Количество размерных групп для деталей типа «отверстие» (n_1) и «вал» (n_2); $n_1 = n_2$	Коэффициенты относительной асимметрии для законов распределе- ния отклонений размеров		Средний зазор в соединениях (в % от среднего заданного значения)
				для деталей типа «отверстие»	для деталей типа «вал»	
1	$a = b = ITS/3$	$eib = -S_{\max} + a$	4	0	+0,5	103
2	$a = b = ITS/4$	$eib = -S_{\max} + a$	5	-0,4	от 0 до +0,3	99
				-0,3	от +0,2 до +0,5	98
				-0,2	от +0,4 до +0,5	101
				-0,1	от +0,4 до +0,5	113
				0	+0,5	110
3	$a = b = ITS/5$	$eib = -S_{\max} + a$	7	-0,5	от 0 до +0,5	97
				-0,4	от +0,2 до +0,5	99
				-0,3	от +0,2 до +0,5	104
				-0,2	от +0,3 до +0,5	107
				-0,1	от +0,4 до +0,5	112
4	$a = b = ITS/6$	$eib = -S_{\max} + 2a$	8	-0,4	от 0 до +0,3	91
				-0,3	от 0 до +0,5	93
				-0,2	от 0 до +0,5	99
				-0,1	от +0,1 до +0,5	103
				0	от +0,2 до +0,5	107
5	$a = b = ITS/8$	$eib = -S_{\max} + 3a$	10	-0,4	от 0 до +0,1	92
				-0,3	от 0 до +0,5	89
				-0,2	от 0 до +0,5	94
				-0,1	от 0 до +0,5	100
				0	от 0 до +0,5	104
6	$a = b = ITS/10$	$eib = -S_{\max} + 3a$	13	-0,4	от 0 до +0,5	89
				-0,3	от 0 до +0,5	94
				-0,2	от 0 до +0,5	99
				-0,1	от +0,1 до +0,5	103
				0	от +0,2 до +0,5	107

Эти параметры установлены при условиях:
допуски на отклонения размеров от номинального значения и зазоры в соединениях соответствуют действующей системе допусков и посадок;
допуски отклонений размеров сопрягаемых поверхностей равны друг другу ($ITA = ITB$);
групповые допуски на отклонения размеров деталей типа «отверстие» и «вал» равны между собой ($a = b$);
законы распределения отклонений размеров отверстий и валов могут быть однотипными (например, близкий к нормальному закон распределения для отверстий и близкий к нормальному закон распределения для валов);

коэффициенты относительной асимметрии могут принимать значения от $\alpha_o = 0$ до $\alpha_o = -0,5$ для закона распределения отклонений размеров отверстий и от $\alpha_b = 0$ до $\alpha_b = +0,5$ для валов;

количество деталей типа «отверстие» равно количеству деталей типа «вал» и равно общему количеству соединений.

Из данных табл. 1 и 2 следует, что наибольшая независимость сборки от типов законов распределения отклонений размеров сопрягаемых поверхностей, их количественных параметров и асимметрии достигается при групповых допусках $a = b = ITS/5$. Именно этот вариант сборки соединений методом межгрупповой взаимозаменяемости рекомендуется для практического использования при повышении точности соединений на один квалитет.

Для повышения точности соединений на два квалитета рекомендуется производить сборку с групповыми допусками, равными $a = b = ITS/6$, если законы распределений отклонений размеров сопрягаемых поверхностей однотипны (табл. 3). Если эти законы разнотипны, то рекомендуется производить сборку с групповыми допусками, равными $a = b = ITS/8$ (табл. 4).

В заключение отметим, что полученные результаты (см. табл. 1–4) распространяются на

квалитеты точности от 6 до 16 и все интервалы размеров в соответствии с действующей системой допусков и посадок.

Выводы. Обоснование параметров сборки соединений деталей машин необходимо проводить методом математического моделирования на ЭВМ. Разработан программный комплекс по моделированию сборки соединений деталей машин на ЭВМ. Определены параметры сборки соединений методом межгрупповой взаимозаменяемости, обеспечивающие повышение точности на один или два квалитета при вероятности возникновения некомплектных деталей, равной нулю, в том числе для условий мелкосерийного производства. Программный комплекс по моделированию сборки соединений деталей машин позволяет обосновывать параметры сборки соединений деталей машин как с зазором, так и с натягом.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ



ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

учебное пособие в 4 кн.

Под ред. Д.В. Черниловского

Кн. 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА. Н.В. Ладогубец, Э.В. Лузик

Содержит основные положения, формулы и законы, используемые при изучении курса "Теоретическая механика", включая динамику материальной точки и динамику материальной системы и твердого тела. Даны алгоритмы решения задач, вопросы для самоконтроля и тестовые задания.

Кн. 2. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ. В.В. Астанин

Изложены основные вопросы расчетов на прочность элементов машин и сооружений. Приведены примеры решения типовых задач на растяжение и сжатие, сдвиг, кручение, изгиб, сложное сопротивление, повторно-переменные и динамические нагрузки.

Кн. 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН. Я.Т. Киницкий

Изложены основные понятия и определения курса, структура и классификация механизмов и машин, общие методы кинематического и динамического исследования механизмов, приведены некоторые сведения из теории регулирования движения машин и уравновешивания механизмов.

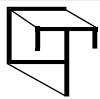
Кн. 4. ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. Д.В. Черниловский

Изложены основные сведения о технологических функциях механизмов, их кинематических и силовых возможностях, достоинствах и недостатках, позволяющих технологию производственных процессов провести анализ и синтез при принятии решения в процессе разработки технического задания на совершенствование существующих конструкций машин или вновь проектируемых машинных комплексов.

Для студентов высших технических учебных заведений, изучающих курсы "Сопротивление материалов" и "Техническая и прикладная механика".

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 004.021

А.Ю. Юрин, канд.техн.наук, доц., Г.С. Малтугуева

(Институт динамики систем и теории управления СО РАН (ИДСТУ СО РАН) г. Иркутск)

iskander@icc.ru

ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ПОВТОРНЫХ ОТКАЗОВ НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ И МЕТОДОВ ГРУППОВОГО ВЫБОРА

Рассмотрен подход к обоснованию мероприятий по предотвращению повторных отказов сложных технических систем, основанный на совместном применении прецедентов и методов группового выбора. Описаны модель прецедента, алгоритмы извлечения (поиска) и повторного использования прецедентов. Приведено описание программной системы и пример применения подхода.

Ключевые слова: отказы, технические системы, мероприятия, прецеденты, методы группового выбора.

An approach to actions substantiation for repeated failures prevention of the complex technical systems is considered. The approach based on combined application of precedents and group choice methods. The precedent model, algorithms of the precedents extraction (search) and repeated utilization are described. The software description and the approach example of application example are adduced.

Key words: failures, technical systems, actions, precedents, group choice methods.

Введение. В процессе эксплуатации технических систем (машин и оборудования) имеет место нарушение их нормального функционирования. При этом возможен переход систем как в безопасное нежелательное состояние (снижение производительности промышленного объекта), так и в опасное (отказ системы в целом (остановка производства), авария и чрезвычайная ситуация). Переход в опасное состояние и нахождение в нём могут сопровождаться взрывом, пожаром, утечкой ядовитых веществ, что обуславливает опасность эксплуатации данных объектов для людей и окружающей среды. Поэтому актуальны оперативные и эффективные мероприятия по предотвращению возможных повторных и развитию фактических отказов технических систем, обеспечивающие их надёжность и безопасность.

Задачу оперативного и эффективного обоснования мероприятий предлагается решить разработкой специализированного программного обеспечения. Для большинства технических объектов данная задача решается на основе технологических регламентов, являющихся нормативными документами и регламентирующими действия разработчиков и обслуживающего персонала. Одним из способов решения задачи поддержки специалистов при обосновании мероприятий является создание и использование продукции экспертов

предметных систем [1] или специализированных справочников. Однако накопленный ранее опыт решения подобных задач в форме информации об отказах и авариях оборудования (включающей весь комплекс причин и следствий) остаётся неиспользованным.

При разработке технических регламентов подобная информация использована. Однако после внедрения нормативных документов информация о новых отказах и авариях не используется вплоть до разработки нового документа. Поэтому в качестве одного из методов решения задачи выбран прецедентный подход [2], согласно которому вся информация об отказах и авариях оборудования сохраняется в виде структурированных образов [3] – прецедентов, образующих базу знаний прецедентной экспертной системы [4]. При этом база знаний непрерывно дополняется в процессе использования экспертной системы, а механизмы поиска и адаптации прецедентов обеспечивают её эффективное повторное использование.

Одной из особенностей применения прецедентных экспертных систем (опыта, представленного в виде прецедентов) является получение в качестве решения набора прецедентов-аналогов, близких по описанию к рассматриваемой ситуации. При этом решение о выборе того или иного прецедента-аналога в качестве прототипа

(окончательного решения) обычно принимает человек на основе ознакомления с подробным описанием всех аналогов, что не всегда эффективно. Предлагается повысить эффективность решения задачи выбора прототипа с помощью методов теории принятия решений, в частности методов группового выбора [5, 6], позволяющих сформировать решение на основе обобщения (агрегирования) решений прецедентов.

Таким образом, необходимо разработать подход к обоснованию мероприятий по предотвращению (предупреждению, локализации, ликвидации последствий) повторных отказов и аварий технических объектов (включая механические и технические системы), основанный на применении прецедентов и методов группового выбора.

Прецедентный подход. Прецедентный подход базируется на принятии решений по аналогии с работами [1–3], для эффективного применения которого не требуется глубокого анализа предметной области: в большинстве случаев достаточно описания проблемы и её решения в виде нескольких примеров. В том случае, если к моменту возникновения новой проблемы уже накоплен значительный опыт решения похожих проблем (описание отказов на разнородном нефтехимическом оборудовании [7]), то применение прецедентного подхода позволяет не только обеспечить поддержку лица, принимающего решение, но и повысить эффективность повторного использования накопленного опыта [4].

Одним из основных понятий является понятие «прецедент» — компактное описание знаний о

событиях, явлениях, процессах и состояниях, содержащее наиболее важные параметры и свойства событий, процессов рассматриваемого объекта. Как правило, прецедент состоит из описания проблемной ситуации и совокупности действий, предпринимаемых в данной проблемной ситуации (её решения).

В случае решения задачи поддержки специалиста при обосновании мероприятий по предотвращению и снижению последствий отказов на основе прецедентов описание проблемной ситуации (инцидента (отказа) или аварии) содержит перечень диагностических признаков, позволяющих однозначно идентифицировать текущее состояние объекта исследования. Решение, в свою очередь, содержит перечень мероприятий по предупреждению повторных отказов и снижению их последствий на основе информации о состоянии рассматриваемого объекта.

Фрагмент концептуальной модели прецедента представлен на рис. 1. На основе данной модели сформирована база прецедентов (база знаний), содержащая информацию о 200 отказах оборудования на нефтехимических и химических предприятиях за период 1964–1996 гг. [7].

Для обеспечения эффективного извлечения прецедентов из базы прецедентов (поиска по образцу) проведена индексация прецедентов [4]. При этом использовались группы диагностических признаков, описывающих различные этапы развития процесса деградации [8] технического объекта — его возможные технические состояния (дефектность, повреждённость, разрушение, от-



Рис. 1. Фрагмент концептуальной модели прецедента

каз, аварийная ситуация, авария, чрезвычайная ситуация) [9]. Использовались индексы двух видов: бинарные (...01001...) и состоящие из кортежей {..., Св_i,...} типа $\langle id, v, w, c \rangle$, отражающие информацию об определённом свойстве (*id*); его значении (*v*); важности или информационном весе (*w*); ограничении на интервал допустимых значений свойства (*c*).

Извлечение (поиск) прецедентов осуществляется в соответствии с глобальной мерой (оценкой) подобия (близости) описаний прецедентов. Под мерой подобия понимается мера схожести описаний двух прецедентов. Так как каждый прецедент представляет собой описание отказа или аварии, представленное набором признаков (параметров технического состояния), то подобными (схожими) считаются отказы или аварии, имеющие одинаковый набор технических характеристик и близкие значения этих характеристик.

Мера подобия вычисляется как расстояние между прецедентами в признаковом пространстве на основе сравнения индексов с помощью метрики Канберра [10].

В результате извлечения (поиска) прецедентов-аналогов пользователь получает некий набор аналогичных отказов, упорядоченных в соответствии с мерой подобия (близости) их описаний и с указанием степени неопределенности (неполноты) полученных оценок подобия. Руководствуясь этим набором, пользователь может ознакомиться с перечнем рекомендованных и принятых мероприятий (содержащихся в извлечённых аналогах) по предотвращению и снижению последствий аналогичных отказов и на основании этих сведений, а также личных знаний и опыта принять решение. В ряде случаев лицу, принимающему решение, приходится обобщать (агрегировать) решения нескольких прецедентов-аналогов, неявно решая задачу группового выбора.

Методы группового выбора. Методы группового выбора позволяют обобщать множество индивидуальных мнений (предпочтений) и формировать на их основе одно агрегированное мнение – отношение группового предпочтения [6]. Задачу группового выбора сформулируем следующим образом: пусть задано конечное множество альтернатив $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$, из элементов которого все члены коллектива, принимающего решение, должны составить свои индивидуальные предпочтения – упорядочить альтернативы по убыванию их предпочтительности. Подобное упорядочение образует обобщённую ранжировку $R^{\langle j \rangle} = A_{i_1} Q_1^j A_{i_2} Q_2^j A_{i_3} Q_3^j \dots, Q_{n-1}^j A_{i_n}$, где $Q_j^i \in \{\succ, \approx\}$ – либо отношение строгого предпочтения, либо отношение эквивалентности. Из индивидуальных

предпочтений формируется *m*-мерный кортеж ранжировок $R = (R^{\langle 1 \rangle}, \dots, R^{\langle m \rangle})$, где *m* – количество участников выбора.

Требуется построить отношение коллективного предпочтения $R_{agg} = F(R^{\langle 1 \rangle}, \dots, R^{\langle m \rangle})$, которое выражает (агрегирует) мнение всего коллектива $\langle A, R \rangle \rightarrow R_{agg}$, т. е. является компромиссным.

Все методы группового выбора условно можно разделить на три группы:

качественные (основанные на попарном сравнении альтернатив);

количественные (основанные на вычислении оценок);

гибридные (представляющие комбинацию качественных и количественных методов).

Методы каждой группы имеют свои достоинства и недостатки: количественные методы всегда позволяют получить решение, но определить его корректность (объективность) сложно; качественные методы не всегда обеспечивают получение решения, однако, по мнению ряда исследователей, они наиболее точно формируют отношение группового предпочтения.

Предлагается применить методы группового выбора в комплексе для обработки информации, полученной из прецедентов (перечня мероприятий).

Совместное применение прецедентов и методов группового выбора. Результатом поиска прецедентов является некий набор прецедентов-аналогов, упорядоченных в соответствии с мерой подобия (близости) их описаний. Используя этот набор, пользователь (лицо, принимающее решение) либо принимает решение, описанное в прецеденте с наибольшей мерой подобия, либо формирует новое решение на основе решений, содержащихся во множестве наиболее близких прецедентов, т. е. решает задачу группового выбора.

Для решения задачи поддержки специалиста при обосновании мероприятий по предотвращению и снижению последствий отказов множество альтернатив *A* представляет собой перечень мероприятий, которые необходимо принять; множество ранжировок *R* – это множество решений, содержащихся в прецедентах-аналогах, где каждая ранжировка представляет собой набор мероприятий, упорядоченных по очерёдности их принятия (по приоритету).

Предлагаемый подход к формированию решения на основе прецедентов с помощью методов группового выбора состоит из трёх этапов:

формирование исходных данных для задачи группового выбора на основе информации из прецедентов-аналогов. Результатом данного этапа является множество наборов данных, содержащих ранжировки с различным количественным и качественным составом альтернатив;

решение задачи группового выбора для каждого набора данных;

согласование результатов, полученных при решении всех задач группового выбора из наборов, для формирования окончательного решения. Данный этап может быть пропущен при существовании единственного набора данных.

Рассмотрим этапы подробнее.

Этап 1: *Формирование исходных данных*. При использовании прецедентов в качестве исходных данных для решения задачи группового выбора необходимо:

сгруппировать решения извлечённых прецедентов-аналогов (решения образуют ранжировки для задачи группового выбора) с учётом их качественного и количественного состава;

учесть близость прецедентов-аналогов при формировании групп решений и предусмотреть возможность исключения из рассмотрения прецедентов-аналогов с низкой оценкой близости, которая сигнализирует о значительном отличии описания прецедента-аналога и текущей проблемной ситуации, и ставит под сомнение корректность его использования при решении текущей проблемы. При получении единственного набора ранжировок (данных) этап согласования результатов (этап 3) будет пропущен.

При этом выполняются следующие действия:

на основе набора прецедентов-аналогов формируются группы, имеющие одинаковую мощность (длину) решения, т. е. осуществляется группировка по количественному критерию;

в каждой группе выделяются подгруппы, содержащие определённые элементы решения (определенные мероприятия), т. е. осуществляется группировка по качественному критерию с выделением подгрупп;

в каждой подгруппе осуществляется обобщение одинаковых решений (ранжировок) с последующим расширением соответствующей ранжировки за счёт указания количества обобщаемых решений. Формируется расширенное множество $R_i^+ = (R^{(i)}, k_i)$, где k_i – количество решений вида $R^{(i)}$. Каждая из подгрупп представляет собой набор данных, для которого в дальнейшем будет решена задача группового выбора (этап 2);

каждому набору данных присваивается информационный вес (важность), вычисляемый как среднеарифметическое значение оценок близости прецедентов-аналогов, на основании которых данный набор сформирован. Данный вес предполагается использовать на этапе согласования результатов (этап 3).

Поясним алгоритм на примере. Дано множество из четырёх альтернатив $A = \{a, b, c, d\}$ и набор прецедентов из восьми элементов $R^{(1)} = \{R^{(1)}, R^{(2)}, \dots,$

$R^{(8)}\}$. Каждый прецедент содержит решение (в виде последовательности альтернатив) и характеризуется оценкой близости в долях от единицы (приведена в скобках):

$$\begin{aligned} R^{(1)} &= a \succ b \succ c \quad (1); \\ R^{(2)} &= a \succ b \succ c \quad (1); \\ R^{(3)} &= a \succ c \succ b \quad (1); \\ R^{(4)} &= a \succ c \succ d \quad (0,5); \\ R^{(5)} &= a \succ c \succ d \quad (0,5); \\ R^{(6)} &= d \succ c \quad (0,5); \\ R^{(7)} &= b \succ c \succ a \quad (0,3); \\ R^8 &= c \succ d \succ a \quad (0,1). \end{aligned}$$

Результаты этапа формирования исходных данных для данного примера приведены в табл. 1:

в результате группировки по количественному критерию выделяются две группы (столбец 1);

в результате группировки по качественному критерию выделяются две подгруппы в первой группе и одна подгруппа во второй (столбец 2);

в результате обобщения одинаковых решений формируются обобщённые ранжировки в первой и второй подгруппах (столбец 3). Выделенные подгруппы образуют три набора данных: P_1 , P_2 , P_3 (столбец 4).

Этап 2: *Решение задачи группового выбора для каждого набора*. Для каждого набора данных, полученного на этапе 1, выполняется процедура поиска решения. Для повышения эффективности данной процедуры предлагается:

осуществить комплексное использование методов группового выбора, т. е. параллельно решать задачу несколькими методами (рис. 2) с последующим согласованием результатов. При этом предполагается, что комплексное применение методов обеспечит решение задачи, снижая вероятность получения некорректных решений и возникновения парадоксов (ситуаций, когда решение не может быть найдено). Также комплексное использование методов группового выбора позволит сравнить решения, полученные разными методами;

использовать для согласования результатов иерархическую (многоуровневую) схему получения решения, когда исходными данными для уровня $(i+1)$ являются результаты уровня i , представленные в виде обобщённых ранжировок. Иерархическая схема позволяет получить решение постепенно за несколько шагов (уровней) и согласовать их. На каждом уровне функционирует определённый набор методов, результатом которых являются отношения группового предпочтения. Полученные решения сравниваются, и сов-

Таблица 1

Пример этапа формирования исходных данных

Группировка по количественному критерию	Группировка по качественному критерию	Обобщённые решения, их количество	Наборы исходных данных
1	2	3	4
$R^{(1)} = a \succ b \succ c$	$R^{(1)} = a \succ b \succ c$	$R_1^+ = (a \succ b \succ c, 2)$	$P_1 = \{R_1^+, R_2^+, R_3^+\} (0,8)$
$R^{(2)} = a \succ b \succ c$	$R^{(2)} = a \succ b \succ c$	$R_2^+ = (a \succ c \succ b, 1)$	
$R^{(3)} = a \succ c \succ b$	$R^{(3)} = a \succ c \succ b$	$R_3^+ = (b \succ c \succ a, 1)$	
$R^{(4)} = a \succ c \succ d$	$R^{(7)} = b \succ c \succ a$		
$R^{(5)} = a \succ c \succ d$	$R^{(4)} = a \succ c \succ d$	$R_4^+ = (a \succ c \succ d, 2)$	$P_3 = \{R_4^+, R_5^+\} (0,3)$
$R^{(7)} = b \succ c \succ a$	$R^{(5)} = a \succ c \succ d$	$R_5^+ = (c \succ d \succ a, 1)$	
$R^{(8)} = c \succ d \succ a$	$R^{(8)} = c \succ d \succ a$		
$R^{(6)} = d \succ c$	$R^{(6)} = d \succ c$	$R_6^+ = (d \succ c, 1)$	$P_2 = \{R_6^+\} (0,5)$

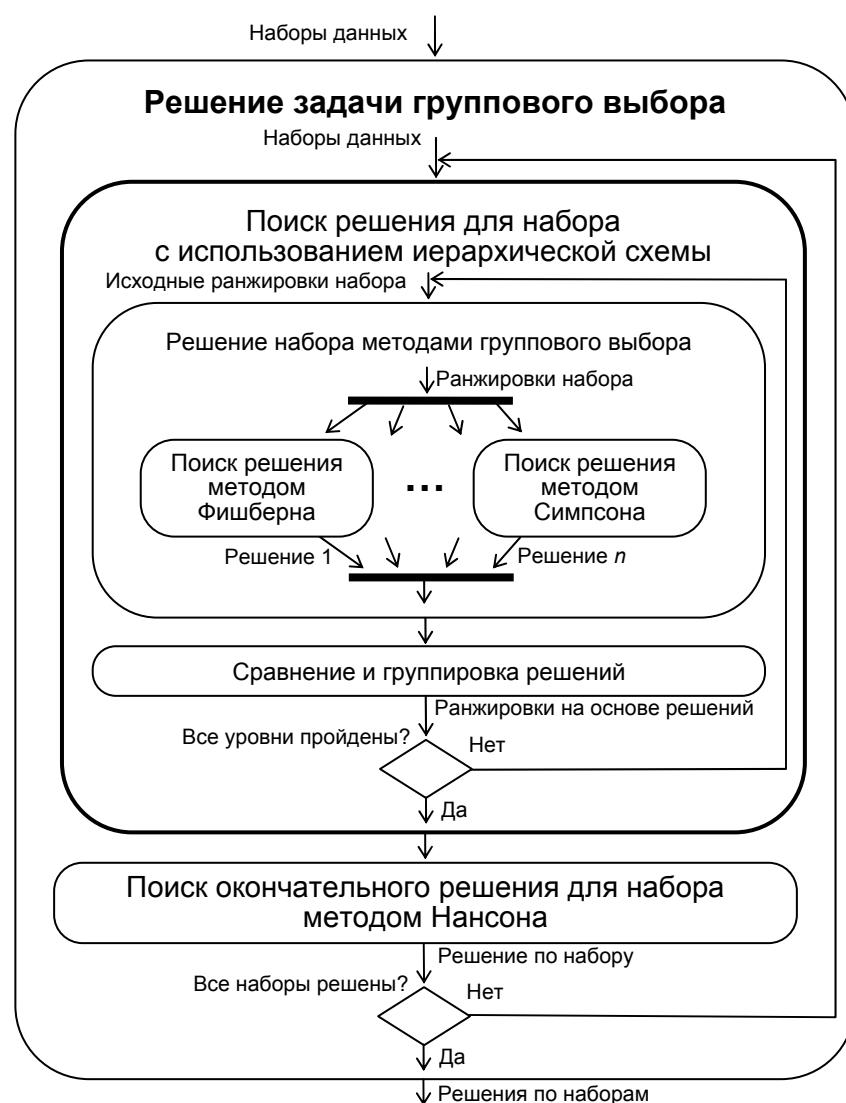


Рис. 2. Алгоритм этапа решения задачи группового выбора

падающие группируются. Подобная схема позволяет сравнивать различные методы, комбинировать, анализировать и получать решение, не зависящее от особенностей (ограничений) того или иного метода, что актуально при решении практических задач в различных предметных областях.

При наличии единственного набора решение, полученное на данном этапе, будет окончательным.

Рассмотрим пример (табл. 2) выполнения этапа решения задачи группового выбора для каждого набора. В примере реализован иерархический последовательный поиск решения с использованием двух уровней (шагов). На первом уровне (шаге) действованы методы Фишберна, Борда, Кондорсе и Симпсона, на втором – метод Нансона [6]:

имеется три набора данных, полученных на этапе 1 (P_1 , P_2 , P_3), для которых необходимо решить задачу группового выбора (столбец 1);

в результате поиска решения методами группового выбора получены промежуточные решения (столбец 2);

в результате сравнения и группировки решений сформированы обобщённые ранжировки (столбец 3), которые будут использованы для получения окончательного решения (столбец 4).

Этап 3: Согласование результатов. После получения решений по каждому набору данных необходимо их согласовать. Для согласования предлагаются решить задачу группового выбора с использованием полученных решений в качестве исходных данных. Для этого необходимо решить следующие задачи:

формирование полного множества альтернатив; дополнение полученных на предыдущем этапе решений отсутствующими альтернативами для формирования обобщённых ранжировок единой длины. При этом добавляемые альтернативы считать эквивалентными. В качестве количества обобщённых ранжировок использовать информационные веса наборов;

выполнение поиска решения по иерархической схеме.

Рассмотрим выполнение этапа 3 на предложенном примере (табл. 3):

существует три решения по наборам данных, полученных на этапе 2 (P_1 , P_2 , P_3), которые необходимо согласовать (столбец 1);

в результате анализа решений наборов формируется полное множество альтернатив (столбец 2);

решения наборов дополняются отсутствующими альтернативами, сформированным обобщён-

Пример этапа решения задачи группового выбора для каждого набора

Наборы данных и их информационный вес	Решения для методов Фишберна, Борда, Кондорсе, Симпсона	Сгруппированные решения и их количество	Окончательное решение для наборов (метод Нансона)
1	2	3	4
$P_1 = \{R_1^+, R_2^+, R_3^+\} (0,8)$	$a \succ b \succ c$ $a \succ b \succ c$ $a \succ b \succ c$ $a \succ b \succ c$	$a \succ b \succ c (4)$	$a \succ b \succ c$
$P_3 = \{R_4^+, R_5^+\} (0,3)$	$a \succ c \succ d$ $a \approx c \succ d$ $a \succ c \succ d$ $a \succ c \succ d$	$a \succ c \succ d (3)$ $a \approx c \succ d (1)$	$a \succ c \succ d$
$P_2 = \{R_6^+\} (0,5)$	$d \succ c$ $d \succ c$ $d \succ c$ $d \succ c$	$d \succ c (4)$	$d \succ c$

Таблица 3

Пример этапа согласования результатов

Окончательное решение для наборов и их информационный вес	Полное множество альтернатив для наборов	«Дополненные» ранжировки и их количество	Окончательное решение
1	2	3	4
$P_1: a \succ b \succ c (0,8)$	$\{a, b, c, d\}$	$a \succ b \succ c \succ d (8)$	$a \succ c \succ b \approx d$
$P_2: a \succ c \succ d (0,3)$		$a \succ c \succ d \succ b (3)$	
$P_3: d \succ c (0,5)$		$d \succ c \succ a \approx b (5)$	

ным ранжировкам назначается их количество. Количество формируется на основе меры близости (этап 1). В результате полученные обобщённые ранжировки имеют одинаковую длину, что позволяет применить для их согласования методы группового выбора (столбец 3) и получить агрегированное компромиссное решение: $R_{agg} = a \succ c \succ b \approx d$ (столбец 4).

Программная реализация и пример применения. Предлагаемый подход применён в составе интеллектуальной программной системы для автоматизированной поддержки специалиста в нефтехимии [4, 11]. Основные функции интеллектуальной программной системы:

описание нежелательного состояния (инцидента или аварии) по имеющейся информации;

выявление причинно-следственного комплекса факторов, обусловивших инцидент или аварию;

обоснование и планирование необходимых мероприятий по предотвращению повторных инцидентов и аварий, восстановлению объекта (системы);

идентификация и интерпретация инцидента или аварии, внесение его в базу данных;

прогнозирование инцидентов и аварий с более высоким уровнем последствий;

формирование отчётной информации об инциденте или аварии.

Программная система обладает простым инструктивным интерфейсом, что сокращает затраты времени на освоение системы при решении различных задач, особенно в случаях редкого обращения к системе, когда забываются принципы взаимодействия с ней.

Центральным модулем программной системы, обеспечивающим решение задач исследования технического состояния машин и конструкций, определения причин отказов и аварий, является гибридная экспертная система. Гибридность экспертной системы характеризуется наличием в её составе двух модулей: один обеспечивает поддержку принятия решений на основании прецедентов, второй – на основании модели причинно-следственного комплекса возникновения отказов и аварий. Модуль, обеспечивающий решение задачи идентификации на основе модели, представляет собой продукционную экспертную систему [12].

Программная система требует настройки на конкретную предметную область (предприятие), т. е. необходимо описать технические системы и аппараты (базы данных «Оборудование» и «Материалы»); ввести знания о деградационных процессах в виде продукционных правил («База правил») и прецеденты («База прецедентов»).

Программная система и предлагаемый подход применены для поддержки принятия решений при определении причин отказов и аварий в нефтехимической промышленности [11].

Пример экранной формы программной системы с результатами поиска прецедентов-аналогов и описание исходных данных (структурной принадлежности объекта инцидента) приведены на рис. 3. В результате поиска получен список из 163 аналогичных отказов упорядоченных по возрастанию оценки близости. Наиболее перспективными являются первые шесть аналогов, наилучшим – аналог № 1 (ID 603), описывающий отказ трубы Д_{у6} фланцевого соединения импульсного трубопровода в отделении компрессии от 18.03.1982. Аналог № 1 имеет наибольшую оценку подобия (94 %).

Специалист (лицо, принимающее решение) может просмотреть решения, принятые по аналогичным отказам, и на основании личных знаний и опыта принять решение. На рис. 3 представлен просмотр решения по аналогу № 1 и обобщённое (агрегированное) решение, полученное на основе применения методов группового выбора. В качестве исходных данных для формирования обобщённого (агрегированного) решения отобраны решения аналогов с близостью из интервала [0,8; 1] волях от единицы (или [80%; 100%]). Именно этот интервал был отмечен системой поддержки принятия решений в качестве наиболее перспективного для получения достоверного решения.

Заключение. Предложен подход к решению задачи поддержки специалиста при обосновании мероприятий по предупреждению и снижению последствий отказов технических объектов (включая механические системы) в нефтехимии на основе комплексного применения прецедентов и методов группового выбора. Рассмотрены модель прецедента, алгоритмы извлечения (поиска) прецедентов и повторного использования информации, содержащейся в решениях. Приведено описание программной системы и пример применения предлагаемого подхода.

В настоящий момент осуществляется тестирование данного подхода при решении задачи выбора конструкционных материалов. Разработан прототип системы группового выбора для проведения тестирования [13].

Использование данного подхода в условиях, когда невозможно (ограниченность теоретических представлений) или нецелесообразно (чрезмерность затрат и ограниченность ресурсов) построение математических моделей для решения задачи обоснования мероприятий по предотвращению и снижению последствий отказов технических систем, позволяет значительно снизить нагрузку на лицо, принимающее решение. При этом формируется решение, основанное не только на информации, содержащейся в прецеденте-аналоге с самой лучшей оценкой близости, но и агрегирующее решение множества прецедентов-

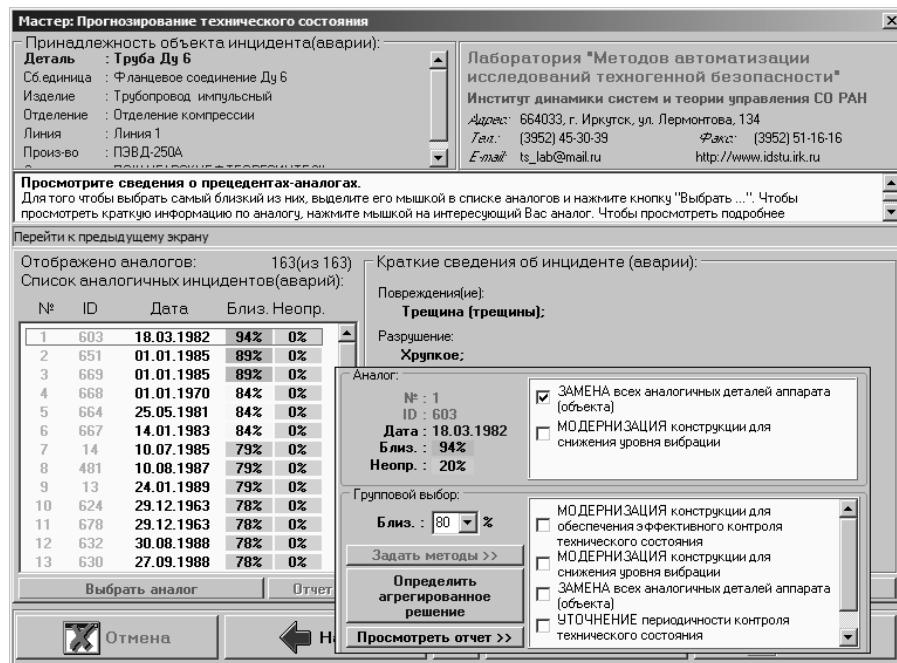


Рис. 3. Просмотр решения по аналогу № 1 и обобщённое (агрегированное) решение

аналогов, признанных релевантными рассматриваемой проблемной ситуации.

Необходимо отметить, что технологические регламенты и другие нормативные документы являются основным источником информации для лица, принимающего решение, а применение предлагаемого подхода только повысит эффективность процесса поддержки принятия решений. Подход применим при наличии представительной базы precedентов и возможности выражения решений, принятых по precedентам, в виде упорядоченных последовательностей событий или мероприятий.

Работа выполнена по междисциплинарному интеграционному проекту СО РАН № 116 «Антропогенные риски угледобывающих и нефтегазодобывающих территорий Сибири».

Библиографические ссылки

1. Джексон П. Введение в экспертные системы. М.: Вильямс, 2001. 624 с.
2. Aamodt A., Plaza E. Case-Based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Communications. 1994. Vol. 7. № 1. P. 39–59.
3. Распознавание, классификация, прогнозирование: Математические методы и их применение. Вып. 2 / под. ред. Ю.И. Журавleva. М.: Наука, 1989. 302 с.
4. Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Применение precedентного подхода для автоматизированной идентификации технического состояния деталей механических систем // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 5. С. 3–12.
5. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора. М.: Наука, 1974. 256 с.
6. Петровский А.Б. Теория принятия решений. М.: Академия, 2009. 400 с.
7. Берман А.Ф., Храмова В.К., Николайчук О.А. База данных по отказам оборудования высокого давления химико-технологических линий по производству полиэтилена // Свидетельство Российской Федерации об официальной регистрации базы данных. М.: Рег. № 990010 от 26.02.99.
8. Берман А.Ф. Деградация механических систем. Новосибирск: Наука, 1998. 320 с.
9. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Пространство технических состояний уникальных механических систем // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2007. № 1. С. 14–22.
10. Лепский А.Е., Броневич А.Г. Математические методы распознавания образов: курс лекций. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2009. 155 с.
11. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И. и др. Интеллектуальная система поддержки принятия решений при определении причин отказов и аварий в нефтехимической промышленности // Автоматизация в промышленности. 2006. № 6. С. 15–17.
12. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 3. С. 48–57.
13. Малтугueva Г.С., Наумов И.А., Юрин А.Ю. Система поддержки принятия решений в задачах группового выбора / Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ) № 2009614243. Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.08.2009.

УДК 656.001.5; 656.001.57

И.В. Щербань, д-р техн. наук, проф., **О.Г. Щербань**, канд. техн. наук, доц., **Д.С. Конев**
(Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону)

shcheri@mail.ru

ОБОБЩЁННАЯ МОДЕЛЬ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕСНОЙ ИНТЕГРАЦИИ РАЗНОРОДНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Предложена стохастическая модель, которая адекватно отражает процессы произвольного движения транспортного средства и может быть использована для построения нелинейных фильтров с целью оптимальной оценки текущих навигационных параметров автомобиля при тесной интеграции разнородных навигационных систем.

Ключевые слова: транспортное средство, стохастическая модель, навигационная система, тесная интеграция.

The stochastic model which adequately reflects processes of vehicle unconditioned movement is proposed. This model can be used for nonlinear filters construction for the purpose of an optimum valuation of the car current navigation parameters at close integration of heterogeneous navigation systems.

Key words: vehicle, stochastic model, navigation system, close integration.

Введение. Современная технология микроэлектромеханических систем (MEMS) позволяет создавать дешёвые инерциальные датчики для использования в составе навигационных систем автомобилей.

Из-за низкой точности подобных измерителей осуществляется их интеграция со спутниковыми навигационными системами (СНС). В настоящее время интегрированные навигационные системы нашли практическое применение в авиации, космической и ракетной технике. Выделяют системы с низким и высоким уровнями интеграции и, соответственно, со слабой и сильной взаимосвязью инерциальной навигационной системы (ИНС) и СНС [1, 2]. Именно на варианте слабой интеграции, когда измерения от каждой из систем обрабатываются на уровне координат местоположения и линейной скорости объекта, основаны попытки синтеза подобных навигационных систем для автомобильной техники [1]. Использование линеаризованных первичных измерений СНС и линейных уравнений ошибок MEMS-датчиков ИНС, устойчивых только на небольших интервалах времени, накладывает серьёзные ограничения на временной интервал автономного произвольного движения транспортного средства (ТС). Эффективных практических решений по варианту слабой интеграции до сих пор не получено.

Поэтому предпочтительным является вариант построения навигационной системы ТС с высоким уровнем интеграции ИНС и СНС, которая будет характеризоваться более точным определением навигационных параметров ТС, более длительным автономным (инерциальным) режимом работы при сбоях СНС и достаточной помехо-

устойчивостью при высокой динамике объекта [2, 3]. Однако для решения требуемой задачи нелинейной фильтрации необходима адекватная модель движения ТС, формирование которой на основе формализма законов Ньютона в этом случае принципиально невозможно, так как основной проблемой является точность прогнозирования вида её правой части на длительные периоды эксплуатации произвольного ТС. Поэтому представляет несомненный научный и практический интерес рассмотренный далее синтез обобщённой модели движения произвольного ТС, не предполагающей конкретизации технических характеристик ТС и возможной для использования в дальнейшем в алгоритмах нелинейной фильтрации при тесной интеграции ИНС и СНС.

Формализация задачи. Для описания движения произвольного ТС использовали правые системы координат (СК): гринвичскую, геодезическую, инерциальную и приборную.

Гринвичская СК $O_{\xi\eta\zeta}$ вращается вместе с Землёй. Начало её координат расположено в центре Земли, ось $O_e\eta$ направлена к Северному полюсу, ось $O_e\zeta$ располагается в плоскости Гринвичского меридиана, а ось $O_e\xi$ дополняет СК до правой.

Начало геодезической горизонтной (сопровождающей) СК $OENh$ совпадает с центром масс (ц. м.) ТС. Эта СК связана с вектором \vec{r} нормальной силы тяжести, а отрезок $QO = h$ является геодезической высотой места. Геодезическая широта ϕ определяется как угол между нормалью к эллипсоиду вращения и экваториальной плоскостью $\xi\zeta$, а геодезическая долгота λ – как угол между плоскостями геодезического и $\eta\zeta$ нулевого, или Гринвичского, меридианов.

Оси невращающейся инерциальной СК $O\xi'\eta'\zeta'$, соответственно, совпадают с осями гринвичской СК в начальный момент времени движения ТС $t_0 = 0$.

Предполагали, что на ТС используется наиболее распространённая бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), а блок MEMS-измерителей включает три линейных акселерометра и три датчика угловой скорости (ДУС). Начало приборной СК $Cxyz$ расположено в ц.м. ТС, а оси направлены по ортогональным осям чувствительности приборов, входящих в состав измерителей БИНС.

Стochasticкая модель движения произвольного ТС. Для вывода модели ТС в самом общем виде, не предполагающем формализацию на основе законов Ньютона, воспользовались основным уравнением инерциальной навигации – уравнением для ускорения ц.м. ТС, измеряемого его акселерометрами [5]:

$$\bar{n} = \bar{w}_a - \bar{g}, \quad (1)$$

где \bar{n} – вектор ускорения, измеряемого акселерометрами; \bar{w}_a – абсолютное ускорение ц.м. ТС; \bar{g} – вектор действительной удельной силы тяжести.

Для связи линейной скорости \bar{V} перемещения ТС относительно Земли с ускорениями, измеряемыми акселерометрами, в векторном уравнении (2) следует конкретизировать выражение для \bar{w}_a с учётом вращения Земли и угловой скорости вращения самого ТС относительно Земли. Так как измерительный блок БИНС жёстко связан с корпусом ТС, вместо уравнения (1) использовали следующее уравнение [5]:

$$\bar{n} = (\dot{\bar{V}})_\omega + (2\bar{\Omega} + \bar{\omega}) \times \bar{V} - \bar{g}, \quad (2)$$

где $\bar{\Omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли; $(\dot{\bar{V}})_\omega$ – производная вектора линейной скорости \bar{V} в системе координат, вращающейся с угловой скоростью $\bar{\omega}$; \times – знак векторного произведения.

Известно, что по информации об измеренных акселерометрами составляющих n_x , n_y , n_z в осях связанного с измерительным блоком трёхгранника $Cxyz$ можно определить проекции n_E , n_N , n_h этого же вектора \bar{n} , но на оси горизонтного трёхгранника $OENh$:

$$\begin{vmatrix} n_E \\ n_N \\ n_h \end{vmatrix} = M_{CE} \begin{vmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где M_{CE} – матрица, определяющая ориентацию горизонтного и связанного с измерительным блоком приборного трёхгранников.

Далее, учитывая принятый разворот осей горизонтной (сопровождающей) СК $OENh$ и связанный с вектором $\bar{\Omega}$ угловой скорости вращения Земли гринвичской СК $O\xi'\eta'\zeta'$, представили векторное произведение, входящее в уравнение (2), в проекциях на оси $OENh$ в виде

$$(2\bar{\Omega} + \bar{\omega}) \times \bar{V} = \left(2 \begin{vmatrix} 0 \\ \Omega \cos \varphi \\ \Omega \sin \varphi \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{\lambda} \sin \varphi \end{vmatrix} \right) \times \begin{vmatrix} V_E \\ V_N \\ V_h \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} V_h(2\Omega \cos \varphi + \dot{\lambda}) + V_N(2\Omega \sin \varphi + \dot{\lambda} \sin \varphi) \\ V_E(2\Omega \sin \varphi + \dot{\lambda} \sin \varphi) + V_h \dot{\phi} \\ -V_E(2\Omega \cos \varphi + \dot{\lambda}) - V_N \dot{\phi} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Следовательно, согласно уравнениям (2) и (4), проекции n_E , n_N , n_h вектора \bar{n} на оси горизонтного трёхгранника определили следующими уравнениями:

$$n_E = \dot{V}_E + V_h(2\Omega \cos \varphi + \dot{\lambda}) + V_N(2\Omega \sin \varphi + \dot{\lambda} \sin \varphi) - g_E,$$

$$n_N = \dot{V}_N + V_E(2\Omega \sin \varphi + \dot{\lambda} \sin \varphi) + V_h \dot{\phi} - g_N; \quad (5)$$

$$n_h = \dot{V}_h - V_E(2\Omega \cos \varphi + \dot{\lambda}) - V_N \dot{\phi} - g_h,$$

где $\Omega = 7,292116 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; V_E , V_N , V_h , \dot{V}_E , \dot{V}_N , \dot{V}_h – восточная, северная и вертикальная составляющие линейной скорости и ускорения ц.м. ТС относительно Земли; g_E , g_N , g_h – составляющие вектора \bar{g} .

При этом входящие в правые части уравнений (5) функции угловых скоростей широты и долготы могут быть представлены зависимостями

$$\lambda = \frac{V_E}{R_\lambda \cos \varphi}; \quad \phi = \frac{V_N}{R_\phi}, \quad (6)$$

где $R_\phi = R_\phi(\varphi, h) = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} + h$; $R_\lambda = R_\lambda(\varphi, h) = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} + h$; e – эксцентриситет эллипсоида (на территории России принят эллипсоид Красовского и $e^2 = 0,0066934$).

Записав уравнения (5) в векторном виде

$$\begin{vmatrix} n_E \\ n_N \\ n_h \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{V}_E \\ \dot{V}_N \\ \dot{V}_h \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} V_h(2\Omega \cos \varphi + \dot{\lambda}) + \\ + V_N(2\Omega \sin \varphi + \dot{\lambda} \sin \varphi) \\ V_E(2\Omega \sin \varphi + \dot{\lambda} \sin \varphi) + V_h \dot{\phi} \\ - V_E(2\Omega \cos \varphi + \dot{\lambda}) - V_N \dot{\phi} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} g_E \\ g_N \\ g_h \end{vmatrix} \quad (7)$$

и учитывая уравнение (3), определили составляющие ускорения ц.м. ТС относительно Земли следующим образом:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \dot{V}_E \\ \dot{V}_N \\ \dot{V}_h \end{vmatrix} &= M_{CE} \begin{vmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{vmatrix} - \\ &- \begin{vmatrix} V_h \left(2\Omega \cos \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda \cos \varphi} \right) + \\ + V_N \left(2\Omega \sin \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda} \operatorname{tg} \varphi \right) \\ - V_E \left(2\Omega \sin \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda} \operatorname{tg} \varphi \right) + V_h \frac{V_N}{R_\varphi} \\ - V_E \left(2\Omega \cos \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda \cos \varphi} \right) - V_N \frac{V_N}{R_\varphi} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} g_E \\ g_N \\ g_h \end{vmatrix}. \quad (8) \end{aligned}$$

Для выражения составляющих g_E , g_N , g_h в дифференциальных уравнениях (8) через параметры состояния ТС воспользовались известными равенствами [2]:

$$g_E = -\gamma \eta_g; \quad g_N = -\gamma \xi_g; \quad g_h = \gamma + \Delta g,$$

$$\text{где } \gamma = \gamma(\varphi) = \frac{a \gamma_e \cos^2 \varphi + b \gamma_p \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \text{ — нормальная}$$

сила тяжести на поверхности земного эллипсоида; $\gamma_e = 9,780$, $\gamma_p = 9,832$ (м/с²) — величины нормальной силы тяжести на земном экваторе и полюсе; $\eta_g = \eta_g(\lambda, \varphi)$, $\xi_g = \xi_g(\lambda, \varphi)$, $\Delta g = \Delta g(\lambda, \varphi)$ — известные в точке расположения ТС восточная и северная составляющие уклонения отвесной линии, а также аномалия силы тяжести, соответственно; a , b — большая и малая полуоси модели земного эллипсоида.

Для представления модели движения ТС в замкнутом каноническом виде необходимо дополнить уравнения (6) и (8) очевидным дифференциальным уравнением для высоты места ТС:

$$\dot{h} = V_h, \quad (9)$$

а также уравнениями, описывающими угловое движение ТС относительно ц.м. и позволяющими сформировать матрицу $M_{CE}(t)$.

Вопрос рационального выбора кинематических параметров для описания углового движения ТС подробно отражён в современной литературе. Известно, что недостатками использования углов Эйлера (или Эйлера–Крылова) являются нелинейность кинематических уравнений и наличие особых точек, а недостатком использо-

вания матриц направляющих косинусов (Пуассона) или параметров Родрига–Гамильтона — необходимость нормирования кинематических уравнений при их численном интегрировании. В то же время преимуществом последних двух видов кинематических параметров является линейность уравнений и, хотя кинематических уравнений Пуассона больше (их девять), чем уравнений Родрига–Гамильтона (их четыре), целесообразно выбрать именно направляющие косинусы (Пуассона).

Параметры Родрига–Гамильтона сравнительно просто выражаются через географические координаты ТС (углы Эйлера–Крылова), но обратная задача, решаемая при комплексировании БИНС и СНС, является более сложной и неоднозначной [2, 5]. Использование уравнений Родрига–Гамильтона оправдано на больших временных интервалах автономного функционирования ТС. В рассматриваемом случае временные интервалы дискретного получения измерительной информации СНС для коррекции БИНС достаточно малы [1–3].

Поэтому определение компонентов $M_{CE}(t)$ осуществляли непосредственно интегрированием матричного уравнения Пуассона:

$$\dot{M}_{CE} = M_{CE} \tilde{\omega}_b - \tilde{\omega}_\gamma M_{CE}; \quad (10)$$

$$\tilde{\omega}_b = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\omega}_\gamma = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_h & \omega_N \\ \omega_h & 0 & -\omega_E \\ -\omega_N & \omega_E & 0 \end{bmatrix},$$

где $\tilde{\omega}_b$ — кососимметрическая матрица, соответствующая вектору угловой скорости вращения приборного трёхгранника; ω_x , ω_y , ω_z — измеряемые ДУСами составляющие вектора угловой скорости вращения, связанной с измерительным блоком приборной СК $Cxyz$; $\tilde{\omega}_\gamma$ — кососимметрическая матрица, соответствующая вектору угловой скорости вращения горизонтного трёхгранника $OENh$; ω_E , ω_N , ω_h — составляющие вектора угловой скорости вращения горизонтного трёхгранника $OENh$.

Начальные значения компонент матрицы $M_{CE}(t_0)$ могут быть при этом определены (см. рисунок) на основе известных начальных значений углов курса $K(t_0) = K$, продольных $\psi(t_0) = \psi$ и боковых $\theta(t_0) = \theta$ отклонений ТС, определяющих взаимную ориентацию измерительного $Cxyz$ и горизонтного $OENh$ трёхгранников (вопросы начальной выставки БИНС не рассматриваются):

$$M_{CE}(t_o) = \begin{vmatrix} \cos K \cos \theta + \sin K \sin \psi \sin \theta & \sin K \cos \theta & \cos K \sin \theta - \sin K \sin \psi \cos \theta \\ -\sin K \cos \theta + \cos K \sin \psi \sin \theta & \cos K \cos \theta & -(\sin K \sin \theta + \cos K \sin \psi \cos \theta) \\ -\cos \psi \sin \theta & \sin \psi & \cos \psi \cos \theta \end{vmatrix}$$

Начальные значения компонент матрицы

Составляющие ω_E , ω_N , ω_h , входящие в уравнение (10), можно определить через параметры состояния ТС на основе следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \omega_E &= -\frac{V_N}{R_\varphi(\varphi, h)}; \quad \omega_N = \Omega \cos \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda(\varphi, h)}; \\ \omega_h &= \Omega \sin \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda(\varphi, h)} \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned}$$

Таким образом, замкнутая модель движения ТС по поверхности Земли в осях горизонтной (сопровождающей) СК имеет вид уравнений (6), (8)–(10). В качестве исходной информации служат измеряемые акселерометрами составляющие n_x , n_y , n_z вектора кажущегося ускорения и показания блока ДУС – составляющие ω_x , ω_y , ω_z вектора угловой скорости и вращения приборной СК. Модель следует из основного уравнения инерциальной навигации, не требует конкретизации характеристик ТС и учитывает процесс его текущего произвольного движения.

В то же время ясно, что измерения датчиков БИНС сопровождаются случайными погрешностями. Поэтому для формирования модели, адекватной реальному процессу движения произвольного ТС по поверхности Земли, необходимо учесть стохастический характер измерений. Каждая конкретная БИНС до её установки на ТС подлежит предварительной тщательной калибровке и, следовательно, допустимо использовать наиболее общее представление моделей выходных сигналов акселерометров и ДУСов:

$$n_i(t) = z_i^n + w_i; \quad \omega_i(t) = z_i^\omega + v_i \quad (i = x, y, z), \quad (11)$$

где z_i^n , z_i^ω – реальные выходные сигналы акселерометров и ДУСов (с учётом смещений нуля и масштабных коэффициентов датчиков); w_i , v_i – белый гауссовский шум (БГШ) с нулевым средним и известной дисперсией.

Известно, что в случаях негауссовых шумов измерений модели выходных сигналов датчиков всегда могут быть представлены в виде уравнения (12) построением формирующих фильтров и расширением вектора состояния [4, 6].

Тогда дифференциальные уравнения (8) будут иметь вид

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \dot{V}_E \\ \dot{V}_N \\ \dot{V}_h \end{vmatrix} &= M_{CE} \begin{vmatrix} z_x^n + w_x \\ z_y^n + w_y \\ z_z^n + w_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_E \\ a_N \\ a_h \end{vmatrix} = \\ &= M_{CE} \begin{vmatrix} z_x^n \\ z_y^n \\ z_z^n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_E \\ a_N \\ a_h \end{vmatrix} + M_{CE} \begin{vmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_E &= g_E - V_h \left(2\Omega \cos \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda \cos \varphi} \right) - V_N \left(2\Omega \sin \varphi + \right. \\ &\quad \left. + \frac{V_E}{R_\lambda} \operatorname{tg} \varphi \right); \quad a_N = g_N - V_E \left(2\Omega \sin \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda} \operatorname{tg} \varphi \right) - V_h \frac{V_N}{R_\varphi}; \\ a_h &= V_E \left(2\Omega \cos \varphi + \frac{V_E}{R_\lambda \cos \varphi} \right) + V_N \frac{V_N}{R_\varphi} + g_h, \end{aligned}$$

а с учётом уравнения (11) первое слагаемое в уравнении (10) примет вид

$$\begin{aligned} M_{CE} \begin{bmatrix} 0 & -(z_z^\omega + v_z) & z_y^\omega + v_y \\ z_z^\omega + v_z & 0 & -(z_x^\omega + v_x) \\ -(z_y^\omega + v_y) & z_x^\omega + v_x & 0 \end{bmatrix} &= \\ &= M_{CE} \tilde{\omega}_b + M_{CE} \begin{bmatrix} 0 & -v_z & v_y \\ v_z & 0 & -v_x \\ -v_y & v_x & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для окончательного представления стохастической модели движения ТС в каноническом виде преобразовали матричное дифференциальное уравнение (10) с учётом уравнение (13) в векторную форму, воспользовавшись для этого правилом сложения вектора $M_{CE}^{(v)}$ размерности 9×1 по элементам матрицы M_{CE} , введённом в работе [7]:

$$M_{CE}^{(v)} = \begin{vmatrix} M_{CE}^1 \\ M_{CE}^2 \\ M_{CE}^3 \end{vmatrix},$$

где M_{CE}^1 , M_{CE}^2 , M_{CE}^3 – столбцы матрицы M_{CE} ,

а также приведённым в работе [6] преобразованием

$$M_{CE}^{(\bar{v})} = \begin{vmatrix} 0_v & -M_{CE}^3 & M_{CE}^2 \\ M_{CE}^3 & 0_v & -M_{CE}^1 \\ -M_{CE}^2 & M_{CE}^1 & 0_v \end{vmatrix}$$

и свойством кронекеровского произведения матриц

$$I \otimes \bar{b} = \begin{vmatrix} \bar{b} & \mathbf{0} \\ \bar{b} & \bar{b} \\ \mathbf{0} & \bar{b} \end{vmatrix},$$

где $M_{CE}^{(\bar{v})}$ – матрица 9×3 , составленная из столбцов матрицы M_{CE} ; 0_v – нуль-вектор 3×1 ; I , \bar{b} – соответственно, единичная и произвольная матрицы размерностей 3×3 (результатирующая матрица здесь имеет размерность 9×9); \otimes – символ кронекеровского произведения.

Тогда получим

$$\begin{aligned} \dot{M}_{CE}^{(v)} &= \begin{vmatrix} \dot{M}_{CE}^1 \\ \dot{M}_{CE}^2 \\ \dot{M}_{CE}^3 \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} 0_v & -M_{CE}^3 & M_{CE}^2 \\ M_{CE}^3 & 0_v & -M_{CE}^1 \\ -M_{CE}^2 & M_{CE}^1 & 0_v \end{vmatrix} \begin{vmatrix} z_x^\omega \\ z_y^\omega \\ z_z^\omega \end{vmatrix} - \\ &\quad - (I \otimes \tilde{\omega}_\gamma) \begin{vmatrix} M_{CE}^1 \\ M_{CE}^2 \\ M_{CE}^3 \end{vmatrix} + \\ &+ \begin{vmatrix} 0_v & -M_{CE}^3 & M_{CE}^2 \\ M_{CE}^3 & 0_v & -M_{CE}^1 \\ -M_{CE}^2 & M_{CE}^1 & 0_v \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{vmatrix} = \\ &= M_{CE}^{(\bar{v})} \begin{vmatrix} z_x^\omega \\ z_y^\omega \\ z_z^\omega \end{vmatrix} - (I \otimes \tilde{\omega}_\gamma) M_{CE}^{(v)} + \\ &\quad + M_{CE}^{(\bar{v})} \begin{vmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\tilde{\omega}_\gamma = \tilde{\omega}_\gamma(V_E, V_N, \phi, h)$.

Проведённые преобразования позволили записать стохастическую модель движения произволь-

ного ТС в канонической векторной форме Ланжевена:

$$\dot{Y} = F(Y, Z; t) + F_0(Y, t) \xi(t); Y(t_0) = Y_0, \quad (15)$$

где $X = \{\lambda, \phi, h, V_E, V_N, V_h, M_{CE}^{(v)}\}$ – вектор размёрности 15×1 ; $Z = \{z_x^n, \dots, z_z^\omega\}$ – вектор размёрности 6×1 выходных сигналов акселерометров и ДУСов БИНС; $M^{(v)}$ – вектор, составленный из компонент матрицы Пуассона; $\xi = [w_x \ w_y \ w_z \ v_x \ v_y \ v_z]^\top$ – вектор БГШ с известными характеристиками, а векторная $F(Y, Z; t)$ 15×1 и матричная $F_0(Y, t)$ 15×6 функции имеют, соответственно, вид

$$\begin{aligned} F(X, Z; t) &= \begin{vmatrix} V_N/R_\phi \\ V_E/R_\lambda \cos \phi \\ V_h \\ M_{CE} \begin{vmatrix} z_x^n \\ z_y^n \\ z_z^n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_E \\ a_N \\ a_h \end{vmatrix} \\ M_{CE} \begin{vmatrix} z_x^\omega \\ z_y^\omega \\ z_z^\omega \end{vmatrix} - (I \otimes \tilde{\omega}_\gamma) M_{CE}^{(v)} \\ 0 \\ 0 \quad | \quad M_{CE} \quad | \quad 0 \\ 0 \quad | \quad 0 \quad | \quad M_{CE}^{(\bar{v})} \end{vmatrix}; \\ F_0(X, t) &= \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \quad | \quad M_{CE} \quad | \quad 0 \\ 0 \quad | \quad 0 \quad | \quad M_{CE}^{(\bar{v})} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Можно назвать следующие особенности уравнений (15): во-первых, они имеют наиболее общий характер, и полученная модель может быть использована для описания любого ТС, произвольно движущегося по поверхности Земли, причём на любом этапе времени его эксплуатации; во-вторых, модель достаточно точно отражает динамику объекта, так как включает реальные измерения БИНС и учитывает модели погрешностей датчиков; в-третьих, обеспечена возможность реализации методов нелинейной дискретной фильтрации при тесной интеграции БИНС и СНС для высокоточной оценки навигационных параметров ТС без каких-либо упрощающих допущений о характере его движения.

Пример численного моделирования. Для обоснования реализуемости рассмотренного подхода и оценки адекватности синтезированной модели выполнили численное моделирование, задавая два вида непрерывного движения ТС в горизонтальной СК $OENh$ в течение 900 с:

равномерное движение по окружности радиусом 50 км с постоянной скоростью 90 км/ч;

такое же движение по окружности, но с имитацией тряски автомобиля из-за неровностей дороги с описанием углов $\Psi(t)$ и $\theta(t)$ высокочастотными гармоническими функциями.

Для обоих случаев рассчитывались исходные функции навигационных параметров $\varphi_{\text{исх}}(t)$ и $\lambda_{\text{исх}}(t)$.

Для определения потенциальной точности модели вначале были выполнены типовые алгоритмы «эталонных» измерений БИНС и без учёта шумовых составляющих датчиков определены функции $n_x(t)$, $n_y(t)$, $n_z(t)$, применяя которые, интегрировали детерминированные уравнения (7), (9)–(11) с шагом 0,1с. Полученные таким образом функции навигационных параметров для обоих вариантов движения ТС $\varphi_{\text{з}}(t)$ и $\lambda_{\text{з}}(t)$ сравнивали со значениями $\varphi_{\text{исх}}(t)$ и $\lambda_{\text{исх}}(t)$:

$$\Delta q_{\text{M}}(t) = q_{\text{исх}}(t) - q_{\text{з}}(t), \quad (q = \varphi, \lambda).$$

В итоге, к концу временного интервала ошибки моделирования местоположения ТС на поверхности Земли по меридиану и широте не превышали 2 м. Полную окружность на поверхности Земли при указанных условиях ТС совершает в течение 12 567 с (за это время аналогичные погрешности не превышали 100 м).

Ошибки $\Delta\varphi_{\text{M}}(t)$, $\Delta\lambda_{\text{M}}(t)$ являются методическими и объясняются следующим. Имитируемые дискретные выходные значения датчиков (на данном этапе n_x , n_y , n_z) рассчитывались в алгоритме «эталонных» измерений и записывались в файл измерений с таким же шагом 0,1 с, как и выбираемый далее шаг интегрирования уравнений (7), (9)–(11). Ясно, что измерения n_x , n_y , n_z в общем случае являются функциями времени. Однако в схеме численного интегрирования (например, Рунге–Кутта) в течение шага интегрирования эти величины, выбираемые из уже сформированного файла измерений, являются постоянными и не пересчитываются, что и обуславливает указанные выше методические погрешности. В то же время известно, что за счёт соответствующего выбора шага интегрирования и, следовательно, частоты съёма измерений БИНС, определяемых из условий и частотных характеристик движения ТС, данная методическая погрешность может быть практически сведена к нулю. Например, уменьшение шага интегрирования на порядок (до 0,01 с) приводило к уменьшению методических ошибок ~ в 8–9 раз.

Далее для моделирования реальных выходных сигналов датчиков на «эталонные» измерения, согласно уравнению (12), накладывали аддитивный БГШ. Значения шумовых составляющих определяли из технических характеристик MEMS-датчиков LSM303DLH (акселерометров) и L3G42000D (ДУСов).

Учитывая полученные функции z_i^n , z_i^ω ($i = x, y, z$), с таким же шагом интегрировали уже стохастические уравнения (15). Из-за шумов измерителей ошибки моделирования местоположения ТС существенно выросли и на 900-й с составляли уже около 5 000 м. При этом вид моделируемого движения ТС (равномерный или с тряской) практически не влиял на конечные результаты.

Заключение. Анализ проведённых численных исследований подтвердил корректность выполненных рассуждений и адекватность синтезированной стохастической модели реальным процессам произвольного движения ТС. Подобные модели могут быть использованы для построения нелинейных фильтров при тесной интеграции ИНС и СНС с целью оптимальной оценки текущих навигационных параметров ТС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства по изготовлению информационно-телекоммуникационных комплексов спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS/Galileo» (постановление правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г.).

Библиографические ссылки

1. Интегрированные инерциальноподсистемы навигации: сб. ст. и докл. [под общ. ред. В.Г. Пешехонова]. СПб.: Электроприбор, 2001. 235 с.
2. Анучин О.Н., Емельянцев Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: Электроприбор, 2003. 390 с.
3. Демидов О.В. Задача тесной интеграции систем ГЛОНАСС и GPS с ИНС разных классов точности: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2009. 139 с.
4. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.
5. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гирокомпасы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976. 672 с.
6. Соколов С.В., Хуторцов В.В. Современные принципы управления и фильтрации в стохастических системах. М.: Радио и связь, 2001. 808 с.
7. Чернов А.А., Ястребов В.Д. Метод оценки возмущений в алгоритмах решения навигационных задач // Космич. исследования. 1984. Т. 22. № 3. С. 537–542.

УДК 681.513

К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **А.В. Пролетарский**, д-р. техн. наук, проф. (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана), **Кэ Фан**, канд. техн. наук, проф. (Юго-западный институт технической физики, Чэнду, Китай), **Ким Чжэсу**, канд. техн. наук (Корпорация «Hanwha», Южная Корея)

neysipin@mail.ru

МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Приведены типы исследуемых беспилотных летательных аппаратов и их навигационные системы. Рассмотрены алгоритмические методы компенсации погрешностей навигационных систем. Представлены способы использования алгоритмов автономной коррекции инерциальных навигационных систем, алгоритмов оценивания, управления, комплексирования и прогнозирования.

Ключевые слова: автономная навигационная система, модель ошибок навигационной системы, алгоритм оценивания, комплексирование, алгоритм самоорганизации, генетический алгоритм.

Researched unmanned aircraft types and their navigation systems are adduced. Algorithmic methods of the navigation systems errors compensation are considered. Utilization methods of the algorithms for inertial navigation systems autonomous correction, the algorithms for estimation, management, interconnecting and prediction are presented.

Key words: autonomous navigation system, navigation system mistakes model, estimation algorithm, interconnecting, self-organization algorithm, genetic algorithm.

Введение. Успешное решение задач управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) во многом определяется уровнем развития измерительной техники. Информационные сигналы измерительных систем имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования БЛА. Повышение точности измерительной информации предполагает исследование погрешностей и последующую их алгоритмическую компенсацию [1, 2].

Рассмотрены вопросы повышения точности навигационных комплексов (НК) возвращающихся в атмосферу БЛА одноразового действия (баллистические ракеты), а также атмосферных БЛА многоразового действия.

Исследуемые типы беспилотных летательных аппаратов. Основное внимание уделено БЛА одноразового действия, функционирование которых исследовано на атмосферном участке полёта. Возвращающиеся в атмосферу БЛА могут двигаться по баллистической траектории и траектории с планирующей фазой. Указанные типы БЛА управляются аэродинамическими силами.

Атмосферные БЛА одноразового действия представлены семейством многообразных крылатых ракет. БЛА осуществляют полёт на основе данных о различных физических полях: радиолокационном, геомагнитном, оптическом. Для получения этой информации на борту БЛА могут быть установлены различные радиолокационные сис-

темы (РЛС), фотоаппаратура и др. Полученная информация сравнивается с априорной информацией в коридоре полёта с помощью корреляционно-экстремальной системы [3].

Рассмотрим возвращающиеся в атмосферу БЛА многоразового действия. Самыми известными ЛА этого класса являются аппараты типа «Шатл–Буран», способные функционировать в беспилотном режиме, а также БЛА Х–37v, Х–47.

Возвращающиеся в атмосферу БЛА одноразового действия представлены стратегическими баллистическими ракетами: Титан-2, Минитмэн 3, Поларис А3, Поларис А3Т (для поражения различных целей), Посейдон С3, MSBS и др., которые отличаются мощностью заряда, типом боевых частей, дальностью, максимальной скоростью и местом базирования.

Системы управления и измерительные комплексы этих типов БЛА имеют много общего.

Управление БЛА исследуемых классов осуществляется на основе информации от НК [1].

В состав НК входят гироскопические системы, различные РЛС и другие навигационные системы, а также системы ориентации.

В соответствии с военными доктринаами, принятыми в странах изготовителях БЛА, в НК может быть использована система GPS/ГЛОНАСС.

НК является первоисточником ошибок при выполнении БЛА поставленных задач. Поэтому определение и последующая компенсация ошибок НК БЛА – важная и актуальная задача.

Погрешности автономных навигационных систем. Как правило, базовой системой НК является инерциальная навигационная система (ИНС), погрешности которой можно разделить на методические и инструментальные.

Методические погрешности ИНС обусловлены методами проведения измерений. К ним обычно относят ошибки, вызываемые, например, неточным знанием структуры и параметров гравитационного поля Земли и количественных характеристик её формы. Сюда же следует отнести погрешности, обусловленные упрощением алгоритмов. Обычно основная часть методических погрешностей успешно компенсируется.

К инструментальным ошибкам, возникающим вследствие погрешностей инерциальных датчиков и вычислительного устройства, относятся, например, случайный дрейф гироскопов, нестабильность масштабных коэффициентов датчиков момента гироскопов и акселерометров, погрешности передачи информации. Причиной других ошибок служат конструкционно-технологические факторы: погрешности выполнения посадочных баз под инерциальные датчики, а также нестабильность взаимного положения этих баз вследствие деформации карданова подвеса в поле силы тяжести или старения материала подвеса. Последние ошибки обусловлены погрешностями начальной выставки, состоящими из неточности внешней информации и ошибок устройств ввода данной информации в ИНС.

Рассматривая реакцию автономной ИНС на определённые возмущающие факторы, можно сделать выводы о характере погрешностей ИНС.

Нулевой сигнал – это сигнал, который по каким-либо причинам появляется на выходе акселерометра, в то время как в действительности никакого ускорения нет. Этот сигнал обычно имеет небольшую величину, представляет собой колебания с периодом Шулера и может привести к значительным ошибкам.

Если погрешность акселерометра изменяется пропорционально времени работы последнего, то погрешность ИНС можно представить в виде нарастающей с течением времени составляющей и наложенной на неё синусоидальной составляющей.

Погрешность ИНС в определении пройденного пути, обусловленная погрешностями первого интегратора, представляет собой синусоидальные колебания с частотой Шулера.

Доминирующее влияние на суммарную погрешность ИНС в определении пройденного пути оказывает скорость дрейфа гироскопов. Систематическая скорость дрейфа гироскопов вызывает нарастающую со временем составляющую погрешности ИНС, а также колебательную составляющую с периодом Шулера.

Нарастающая с течением времени скорость дрейфа обуславливает появление погрешности ИНС, которую можно представить в виде двух составляющих. Первая изменяется пропорционально квадрату времени функционирования ИНС, а вторая совершает колебания с периодом Шулера.

Погрешность ИНС, обусловленная неточностью выставки гиростабилизированной платформы (ГСП) относительно плоскости горизонта, представляет собой синусоидальные колебания с периодом Шулера.

Суммарная погрешность ИНС в определении местоположения ЛА, обусловленная перечисленными выше факторами, нарастает с течением времени.

Рассмотрим уравнения погрешностей ИНС. Предполагается, что опорная система координат должна материализоваться с помощью ГСП, а на самом деле из-за погрешностей оси акселерометров ориентирована по другим осям [2, 3].

В дискретной форме уравнения погрешностей ИНС имеют вид

$$\begin{aligned} x_k &= \Phi x_{k-1} + w_{k-1}; \\ x_k &= \begin{bmatrix} \delta V_{xk} & \delta V_{yk} & \alpha_k & \beta_k & \psi_k & \varepsilon_{xk} & \varepsilon_{yk} & \varepsilon_{zk} \end{bmatrix}^T; \\ w_{k-1} &= \begin{bmatrix} B_x & B_y & 0 & 0 & 0 & w_{xk-1} & w_{yk-1} & w_{zk-1} \end{bmatrix}^T; \\ \Phi = & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -gT f_y T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & gT & 0 & -f_x T & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{R} & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ \frac{T}{R} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ \frac{T}{R} \operatorname{tg}\phi & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1) \end{aligned}$$

где $\delta V_x, \delta V_y$ – ошибки ИНС в определении скорости; α, β, ψ – углы отклонения ГСП относительно опорной системы координат; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – скорости дрейфов ГСП; ϕ – широта местоположения; R – радиус Земли; g – ускорение силы тяжести; f_x, f_y – горизонтальные ускорения объекта, на котором установлена ИНС; μ – средняя частота случайного изменения дрейфа; T – период дискретизации; B_x, B_y – смещение нулей акселерометров; w_x, w_y, w_z – возмущающие внешние воздействия.

Пренебрегая перекрёстными связями, можно записать уравнения ошибок ИНС отдельно для каждого информационного канала.

Уравнения ошибок ИНС в дискретной форме используются при реализации алгоритмов коррекции НК.

Инструментальные погрешности можно разделить на погрешности акселерометров, интеграторов, гироскопов и ошибки выставки ГСП.

При достаточно длительном времени функционирования ИНС погрешности могут достигать недопустимо больших величин. Поэтому необходимо корректировать ИНС с помощью различных источников внешней навигационной информации либо компенсировать погрешности с использованием внутренних связей системы.

Методы коррекции навигационных систем. Алгоритмы компенсации погрешностей автономных ИНС за счёт внутренних связей системы известны [2, 3] и детально разработаны. Вектор измерений в таких алгоритмах формируется на основе сигналов с датчиков углов прецессии. ИНС, снабжённые подобными алгоритмами, имеют остаточные погрешности, вызванные различными возмущающими факторами, соизмеримыми с погрешностями, которые обусловлены динамическим дрейфом ГСП.

Таким образом, при автономной работе ИНС на всём интервале полёта БЛА, используются методы коррекции ИНС с помощью только внутренней информации.

Наиболее полная компенсация погрешностей ИНС осуществляется алгоритмической обработкой информации с ИНС и дополнительным внешним по отношению к ИНС датчиком навигационной информации. Компенсация погрешностей в выходной информации системы обычно осуществляется алгоритмами оценивания. Хорошо известный фильтр Калмана теоретически позволяет получить оптимальную оценку вектора состояния системы. В практических приложениях используются прямые адаптивные модификации фильтра Калмана [2–5], позволяющие получать нерасходящиеся оценки погрешностей ИНС.

Коррекция ИНС от внешних источников информации с применением различных алгоритмов позволяет существенно снизить погрешности получаемой навигационной информации. В качестве примера использования алгоритмов для коррекции навигационной информации рассмотрим ИНС с внешним источником информации, в качестве которого применяется GPS.

Для наиболее полной компенсации погрешностей в выходной информации необходимо предварительно оценить ошибки ИНС. Сделать это возможно, воспользовавшись алгоритмами оптимального оценивания, позволяющими вычислять все оценки ошибок ИНС, поддающиеся наблюдению.

Входным сигналом для алгоритма оценивания является разность в измерении скорости с помощью ИНС и GPS. Ошибки ИНС составляют вектор состояния системы и включают ошибки по

скорости, углу и дрейф гироскопов, а ошибки GPS представляют собой измерительный шум.

После обработки измерений на выходе алгоритма оценивания получаем оценку вектора состояния, т. е. оценку всех наблюдаемых ошибок ИНС. Далее оценка ошибок ИНС алгебраически вычитается из выходного сигнала ИНС, состоящего из достоверной информации о скорости и местоположении БЛА и ошибок ИНС. Тем самым компенсируются в выходном сигнале ошибки ИНС в определении навигационных параметров.

Оценку ошибок ИНС можно использовать в регуляторе для компенсации ошибок по скорости, углу и дрейфу гироскопов в структуре ИНС, уменьшая тем самым амплитуду колебаний ошибок и улучшая качество переходного процесса.

Исследование измерительного комплекса БЛА показало, что наиболее перспективным методом повышения точности информации о навигационных параметрах и параметрах ориентации является алгоритмический подход. Используемое информационное обеспечение измерительного комплекса БЛА включает алгоритмы управления и оценивания. Алгоритмы управления используются для коррекции измерительных систем, входящих в измерительный комплекс ЛА.

Использование для повышения точности измерительного комплекса ЛА алгоритмов оценивания позволяет проводить коррекцию в выходном информационном сигнале, не вмешиваясь в динамику измерительных систем.

В настоящее время для коррекции измерительного комплекса ЛА предлагается использовать классические алгоритмы оценивания. Как правило, это фильтр Калмана и его различные адаптивные модификации [2, 3, 5]. Однако эти фильтры не позволяют проводить коррекцию измерительного комплекса ЛА, когда сигнал от внешнего источника временно отсутствует. Сигналы спутниковых навигационных систем подвержены воздействиям активных и пассивных помех. Поэтому возможно появление интервалов полёта ЛА, когда получать достоверную навигационную информацию не представляется возможным.

При отсутствии сигналов от GPS для коррекции ИНС используются другие датчики, например датчики угловых ускорений.

Большое количество различных систем и датчиков навигационной информации позволяет осуществлять комплексную обработку информации. Совместная обработка информации от нескольких датчиков или систем называется комплексированием. Совокупность алгоритмически связанных навигационных систем и датчиков называется НК.

НК представляют собой некоторое количество систем и датчиков, в основу принципа действия

которых положены различные физические закономерности. Эти системы объединены алгоритмически.

Традиционной схемой НК является ИНС, принятая за базовую систему, снабжённая несколькими датчиками внешней информации, алгоритмами комплексирования и оценивания. Алгоритмы комплексирования представляют собой алгоритмы обработки сигналов от используемых навигационных систем и датчиков [1, 3].

Увеличение количества измерительных систем теоретически позволяет с большой точностью получить информацию о навигационных параметрах объекта. На практике же при использовании систем с различными точностными характеристиками и из-за несовершенства алгоритмического обеспечения точность определения навигационной информации снижается.

Поэтому с помощью алгоритмов комплексирования выделяются системы, позволяющие получить наиболее достоверную информацию о навигационных параметрах БЛА, или в процессе совместной обработки сигналов с различных систем выделяется наиболее достоверная информация [3].

Точность корректируемых ИНС в значительной степени зависит от погрешностей внешнего источника информации и ошибок используемого алгоритма, в частности от адекватности математической модели погрешностей ИНС.

При длительном функционировании ИНС без коррекции углы отклонения ГСП нарастают. Следствием этого является неадекватность математической модели реальному процессу изменения погрешностей ИНС. Тогда применяют коррекцию ИНС в структуре системы с помощью алгоритмов управления [3, 6].

Компенсация погрешностей в структуре ИНС, как правило, проводится с помощью адаптивных регуляторов [1, 3]. Недостатком этого подхода является высокая чувствительность схемы к ошибкам оценивания погрешностей ИНС.

Когда источники внешней информации отключены, проводится коррекция навигационных систем с помощью алгоритмов прогноза, позволяющих осуществлять прогноз погрешностей навигационной системы. Затем спрогнозированные оценки погрешностей используются в известных схемах коррекции [2, 3, 5].

Для повышения точности функционирования ИНС в автономном режиме необходимо построить математическую модель ошибок ИНС, в предшествующем корректируемом режиме осуществить прогноз ошибок и использовать его в выходной информации для компенсации ошибок.

Эту задачу целесообразно решать алгоритмически на борту БЛА, так как можно получить эф-

фект с наименьшими временными и материальными затратами, используя системы современного уровня точности. Реализация алгоритмов на борту БЛА в БЦВМ накладывает на них специфические требования. Основным ограничением является малый объём машинной памяти, отводимый для реализации алгоритмов.

Прогнозирующие модели используются в схемах коррекции навигационных систем при исчезновении сигналов от внешних измерительных систем. При краткосрочном исчезновении выходных сигналов ИНС, GPS и других систем обычно используются априорные модели для прогнозирования полезного сигнала. Для ИНС могут быть использованы априорные модели, например вида (1).

В условиях длительного отсутствия сигналов от внешних измерителей априорные модели с течением времени становятся неадекватными реальному процессу изменения погрешностей ИНС. Поэтому модели погрешностей ИНС необходимо строить в процессе функционирования БЛА.

Методы построения моделей известны и отличаются по точности и объёму машинной памяти, необходимой для реализации в БЦВМ. Наиболее простыми методами являются различные модификации линейных трендов [3, 6]. Более сложные методы позволяют построить высокоточные модели, но требуют большего времени и значительного объёма машинной памяти БЦВМ. К таким методам относятся разнообразные нейронные сети, алгоритмы самоорганизации и генетические алгоритмы [3, 6].

Нейронные сети позволяют построить модели исследуемых объектов с достаточно высокой точностью, но требуют при этом длительного времени для реализации процесса обучения.

Метод самоорганизации можно использовать в условиях минимального объёма априорной информации, а также без учёта некоторых существенных факторов. Подход самоорганизации можно также использовать в условиях превышения в несколько раз помех по сравнению с полезным сигналом.

Возможность прогнозирования без учёта некоторых определяющих факторов объясняется тем, что в сложных системах факторы коррелированы между собой, следовательно, измерение одного фактора содержит информацию о других факторах, связанных с измеряемым.

Работа генетического алгоритма представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не реализуется заданное число поколений селекции или какой-либо иной критерий останова. На каждом поколении генетического алгоритма реализуются отбор, кроссинговер и мутация.

Использование только генетического алгоритма для решения задачи не эффективно, так как поиск оптимального значения параметров аппроксимирующей функции проводится недостаточно направленно.

Найти глобальный минимум в общем случае достаточно трудно из-за наличия значительного количества локальных экстремумов, и такая задача требует значительных вычислительных затрат при практически полном переборе возможных решений с заданной точностью.

Таким образом, перечислены наиболее популярные классические методы построения моделей погрешностей ИНС. С учётом особенностей реализации алгоритмов в БЦВМ предпочтение целесообразно отдавать алгоритмам самоорганизации.

Выводы. Рассмотрены концептуальные алгоритмические методы повышения точности навигационной информации.

Для коррекции автономных ИНС целесообразно использовать алгоритмы компенсации погрешностей с использованием информации с датчиков углов прецессии.

В корректируемом режиме компенсация погрешностей ИНС осуществляется в выходном сигнале системы с использованием аддитивных алгоритмов оценивания.

При использовании на БЛА нескольких датчиков навигационной информации целесообразно осуществлять селекцию измерительной информации с помощью алгоритмов комплексирования.

Компенсация погрешностей ИНС в автономном режиме на основе информации, полученной в предшествовавшем корректируемом режиме, осуществляется в выходном сигнале с помощью прогнозирующих моделей. При краткосрочном прогнозе используются априорные модели и линейные тренды. Для долгосрочного прогноза модели строятся на борту БЛА. Получение реализуемых в БЦВМ прогнозирующих моделей рекомендовано осуществлять с помощью алгоритмов самоорганизации.

Библиографические ссылки

1. Агеев В.М., Павлова Н.В. Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990. 375 с.
2. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982. 225 с.
3. Неусыпин К.А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.
4. Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И. Задача коррекции в инерциальной навигации: М.: Изд-во МГУ, 1982. 187 с.
5. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 420 с.
6. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985. 320 с.



РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов

2012 г. Объем 304 с. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-657-4 Цена 500 р.



Рассмотрены общие сведения о резании материалов, вопросы стружкообразования, сложные схемы резания, тепловые явления, прочность, износ и стойкость инструментов, обрабатываемость материалов резанием и особенности процесса резания многолезвийными и абразивными инструментами.

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов: "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств".

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 553.98.048

В.К. Шемелин, канд. тех. наук, проф., А.В. Филипенков (МГТУ «Станкин», г. Москва)

filipenkov@mtg.gazprom.ru

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИСПЕТЧЕРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО РАСХОДУ ГАЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Предложен метод повышения достоверности диспетчерско-технологической информации по расходу газа газораспределительной станцией (ГРС) на основе регрессионного анализа. Представлены конкретные исходные данные зависимости расхода газа от дня недели, времени суток и температуры окружающей среды. Для описания нелинейной зависимости газопотребления от температуры воздуха представлена кусочно-линейная модель. Разработан алгоритм прогнозирования расхода в зависимости от температуры окружающей среды.

Ключевые слова: достоверность, диспетчерско-технологическая информация, регрессионный анализ.

The reliability increase method of dispatching and technological information over the gas-distributing station gas consumption on the basis of the regression analysis is offered. Specific initial data of the gas consumption dependence from a day of the week, time of day and ambient temperature are presented. For description of the gas consumption nonlinear dependence from air temperature the piecewise linear model is presented. The forecasting algorithm of the expense dependence from ambient temperature is developed.

Key words: reliability, dispatching and technological information, regression analysis.

Получение достоверной информации по текущим параметрам функционирования газотранспортной системы является одной из основных задач диспетчерского управления. В настоящее время для определения достоверности диспетчерско-технологической информации по расходу газа на газораспределительной станции (ГРС) используется схема, представленная на рис. 1.

В схеме (см. рис. 1) блок «Алгоритмы» содержит перечень следующих методов по проверке достоверности диспетчерско-технологической информации:

контроль уставок. Метод, при котором для каждого контролируемого параметра Π устанавлива-

ваются его максимальное Π_{\max} и минимальное Π_{\min} допустимые значения, при этом отслеживаются случаи выхода значения параметра за границы установленного интервала:

$$\Pi_{\min} < \Pi < \Pi_{\max};$$

контроль скорости изменения параметров. Данный метод предназначен для отслеживания ситуаций, когда значение контролируемого параметра Π претерпело изменение $\Pi_{\text{изм}}$, превышающее допустимое Y :

$$\Pi_{\text{изм}} = \frac{|\Pi_1 - \Pi_0|}{\Pi_0} < Y;$$

контроль с применением математической модели объектов. Данные методы позволяют произвести оценку достоверности собранных данных по расходу газа ГРС на текущий момент времени. Имея такую оценку, диспетчер, исходя из личного опыта, может спрогнозировать дальнейшее изменение параметров, что позволит контролировать расход газа на плановом уровне. Для облегчения прогноза и повышения достоверности диспетчерско-технологической информации предлагается дополнить существующую схему блоком по прогнозированию расхода газа (рис. 2).

Как видно из рис. 2, после проверки на достоверность текущих (фактических) значений расход-

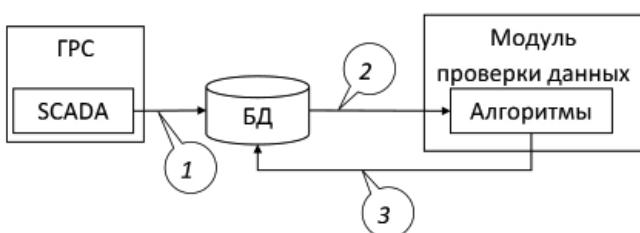


Рис. 1. Проверка достоверности диспетчерско-технологической информации:

1 – запись данных по расходу газа в БД; 2 – передача данных для проверки на достоверность; 3 – запись проверенных данных в БД для дальнейшей работы

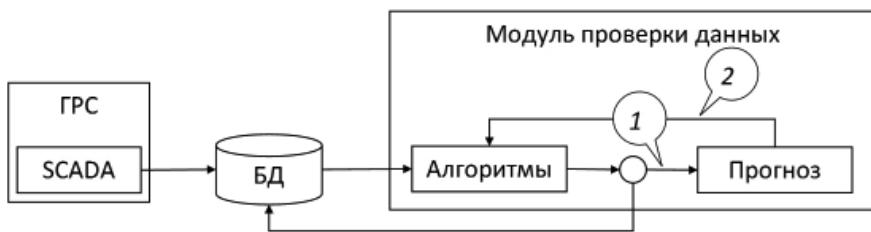


Рис. 2. Проверка достоверности диспетчерско-технологической информации с применением прогнозирования:
1 – достоверные данные, участвующие в прогнозировании; 2 – прогнозируемые параметры

Зависимость расхода газа

T	D										...	
	14.03.12		21.03.12		28.03.12		04.04.12		11.04.12			
	t, °C	Q, м³/ч										
01:00	-0,2	11 879	-0,3	11 931	-7,0	12 601	-1,5	12 190	2,8	7909	...	
04:00	-1,6	11 703	-0,4	11 167	-8,2	12 398	-2,3	11 064	2,2	7827		
07:00	-2,0	13 143	-1,3	12 510	-9,2	13 648	-3,7	13 657	1,8	9518		
10:00	-1,9	13 509	-0,5	13 490	-6,6	13 551	-0,1	12 027	2,5	8988		
13:00	-1,0	12 666	1,2	12 528	-3,3	12 899	3,2	10 553	4,6	8294	...	
16:00	-1,4	11 228	1,7	11 035	-1,6	11 818	4,6	10 289	6,4	7750		
19:00	-1,4	12 337	-0,1	12 305	-4,0	12 739	2,0	10 919	5,0	9031		
22:00	-4,6	14 097	-1,6	13 187	-6,8	14 229	-0,8	12 191	4,6	9710		

П р и м е ч а н и е. T – сеанс сбора; t – температура окружающей среды; Q – расход газа; D – день недели.

да газа Q_{ϕ} (блок «Алгоритмы») они поступают в блок «Прогноз», где с применением методов регрессионного анализа осуществляется прогнозирование будущих (расчётных) значений Q_p , которые в дальнейшем используются при оценке достоверности последующих фактических значений расхода газа:

$$Q_{\phi} = Q_p \pm \xi,$$

где ξ – допустимая погрешность.

Алгоритм прогнозирования расхода газа. Будем считать процесс газопотребления нестационарным, так как известно, что потребление газа изменяется в течение суток, недели и года – ясно выражается тенденция к уменьшению потребления газа вочные часы, праздничные дни и летние месяцы [1].

Составим сводную таблицу, в которой приведём исторические значения зависимости расхода газа от дня недели ($D = \text{const}$) и температу-

ры окружающей среды. Для основных потребителей приняты следующие границы интервалов температуры t : $-\infty; -10; -5; -2,5; 0; +2,5; +10; +\infty$ ($^{\circ}\text{C}$). Значения $T = \text{const}$ и $D = \text{const}$ позволяют исключить влияние суточной и недельной неравномерности потребления газа.

Нелинейную зависимость газопотребления от температуры воздуха представим в виде следующей кусочно-линейной функции [2]:

$$Q(t) = \begin{cases} K_1(a_1t + b_1), & \text{если } -\infty < t \leq -10; \\ K_2(a_2t + b_2), & \text{если } -10 < t \leq -5; \\ K_3(a_3t + b_3), & \text{если } -5 < t \leq -2,5; \\ K_4(a_4t + b_4), & \text{если } -2,5 < t \leq 0; \\ K_5(a_5t + b_5), & \text{если } 0 < t \leq +2,5; \\ K_6(a_6t + b_6), & \text{если } +2,5 < t \leq +10; \\ K_7(a_7t + b_7), & \text{если } +10 < t \leq +\infty, \end{cases}$$

где a_i, b_i ($i = 1, \dots, 7$) – коэффициенты регрессионного уравнения [3], сохраняющие постоянные значения внутри температурных интервалов; K_i ($i = 1, \dots, 7$) – аддитивный коэффициент.

Используя аппарат математической статистики, составим систему уравнений, описывающих зависимость расхода газа от дня недели ($D = \text{const}$), сеанса сбора ($T = \text{const}$) и температу-

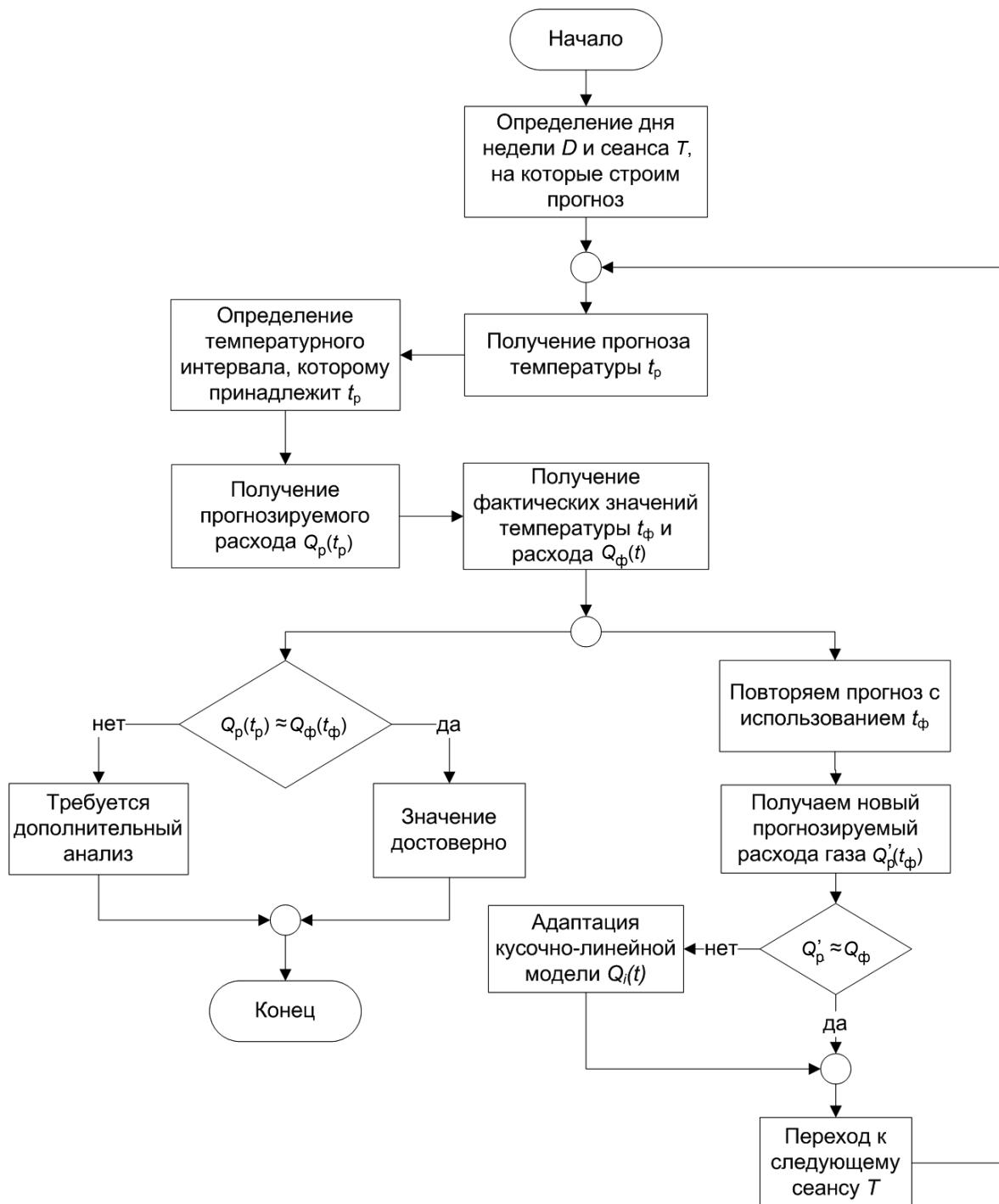


Рис. 3. Алгоритм проверки достоверности диспетчерской информации по расходу газа

Алгоритм проверки достоверности с использованием описанного выше метода прогнозирования приведён на рис. 3.

Таким образом, предложенный метод, основанный на регрессионном анализе, значительно повышает достоверность обрабатываемой информации и может быть использован в диспетчерских системах с высокой дискретностью сбора данных.

Библиографические ссылки

1. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Оптимизация систем транспорта газа. М.: Недра, 1975. 277 с.
2. Словари и энциклопедии на Академике [Электронный ресурс]. URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/econ_dict/21315 (дата обращения: 04.05.2012).
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1977. 832 с.

УДК 004.415.2

В.И. Летовальцев (Вологодский государственный технический университет)

LetovaltsevVictor@gmail.com

АЛГОРИТМЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ СМЫСЛА ТЕКСТА НА ОСНОВЕ ФОРМАЛЬНОЙ СЕМАНТИКИ

Описаны алгоритмы семантического анализа на основе формальной семантики. Алгоритм формализации смысла осуществляет построение формул интенсиональной логики, а алгоритм интерпретации даёт возможность автоматизации вычисления истинностного значения этих формул на основе данных о предметной области.

Ключевые слова: формальная семантика, семантический анализ, интенсиональная логика, обработка естественного языка.

Semantic analysis algorithms on the basis of formal semantics are described. The sense formalization algorithm carries out formulas construction of intensional logic; the interpretation algorithm gives the automation calculation possibility of these formulas truth meaning on the basis of the object domain date.

Key words: formal semantics, semantic analysis, intensional logic, natural language processing.

Эффективность работы современной организации в информационном обществе зависит от скорости и качества удовлетворения потребностей в служебной информации каждого из сотрудников. Информационные хранилища корпоративных информационных систем могут достигать огромных размеров, что сильно затрудняет поиск.

Часто необходимая информация распределена по различным информационным системам внутри организации. Основные причины этого – различие используемой терминологии и специфическая структура хранимой информации. Возникает парадоксальная ситуация, когда пользователь имеет доступ к информации, но не может её получить. Всё более актуальной становится проблема теоретического рассмотрения и практической реализации механизмов и средств автоматизации поиска информации.

Существует множество методов семантического анализа текстов. Логический подход к автоматическому анализу текстов распространён в среде лингвистов и логиков. Такой подход имеет большой потенциал и в сфере компьютерных технологий. Работы Ричарда Монтегю сформировали целое направление, получившее название «формальная семантика». Основная идея его работ выражена в названии одного из его основополагающих трудов – «English as a formal language» [1]. Любой естественный язык (ЕЯ) предлагается понимать как формальный логический язык, который является более сложным по отношению к существующим формальным языкам. При описании ЕЯ предлагается использовать такие же понятия и конструкции, как и для других логических языков.

Для изучения семантико-синтаксических связей Монтегю описал синтаксис и семантику достаточно близкого к ЕЯ логического языка. Тогда описание семантики ЕЯ сводится к представлению текста в сконструированном логическом языке, а интерпретация смысла представляется как вычисление истинностного значения формулы в определённой модели.

Начальным этапом обработки является преобразование текста на основе языковой составляющей логики. Такая обработка обычно выполняется набором лингвистических процессоров. Причина необходимости использования лингвистических компонентов кроется в том, что данный слой логики напрямую зависит от синтаксиса ЕЯ и может сильно различаться для конкретных ЕЯ. Введение слоя лингвистической обработки позволит до некоторой степени нивелировать эти различия.

Этап лингвистической обработки сильно зависит от грамматики и синтаксиса языка изложения текста. Поэтому целесообразно использовать лингвистические анализаторы, специфичные для конкретных ЕЯ. В качестве компонента лингвистической обработки используем лингвистический процессор группы АОТ [2].

Результатом синтаксического анализа в лингвистическом анализаторе при использовании компонентов группы АОТ будет являться набор групп и клауз, составляющих предложение. В этом случае цель синтаксического анализа – построение синтаксических групп на одном морфологическом варианте одной клаузы.

Можно сказать, что клауза (фрагмент) – это простое предложение в составе сложного. Важное

свойство подклаузы состоит в том, что она может входить в синтаксические группы наравне с атомарными словами (юнитами).

Выделим следующие параметры синтаксической группы: номер первого и последнего юнита, тип группы, главную подгруппу, граммы группы.

В частном случае группа – один юнит, тогда номер первого и последнего юнита совпадают. Такую группу называют атомарной. Неатомарные группы подчиняются принципу проективности: если две группы пересекаются, то одна лежит в другой (т. е. является её подотрезком).

Перечислим правила, на которых будет базироваться предлагаемая древовидная структура лингвистических данных:

текст состоит из предложений;

каждое предложение в тексте имеет порядковый номер. Порядковые номера предложений в тексте исчисляются с нуля;

каждое предложение состоит из слов. Слова имеют порядковые номера в предложении, начинающиеся с нуля;

текст может иметь любое число предложений (в том числе ноль);

каждое слово имеет как минимум одну характеристику – написание (или форму написания, использованную форму слова). Это данные строкового типа, представляющие слово в такой форме, как оно было употреблено в предложении;

слово может иметь дополнительные морфологические характеристики: начальную форму, морфологическое описание, часть речи. Начальная форма – это именительный падеж, единственное число для группы существительного; именительный падеж, единственное число, мужской род для группы прилагательного; неопределенная форма для группы глагола; само это слово для знаков препинания. Морфологическое описание – это характеристики формы слова, которая встретилась в тексте. Например, к таким характеристикам относятся: род, число, падеж для группы существительного;

предложение может содержать множества слов – группы и клаузы. Клаузы могут содержать группы, но не наоборот;

группы и клаузы состоят из названия и порядковых номеров в предложении первого и последнего слов, входящих в них;

множества слов содержат как минимум одно слово.

Составим описание алгоритма формализации ЕЯ-фразы на основе формальной семантики. На входе алгоритма имеем следующие данные:

1. Дерево синтаксических категорий, построенное синтаксическим анализатором (множества *Syn* и *Morph*). Множество *Morph* предлагается определять таким образом:

$$\begin{aligned} \text{Morph} = & \{ \text{morph}_{\text{элем}} \mid \text{morph}_{\text{элем}} = \\ & = \{ Uf, Bf, PoS, NiS, SN \}, \end{aligned}$$

где *Uf* (used form) – используемая форма слова; *Bf* (begin form) – начальная форма слова; *PoS* (part of speech) – часть речи; *NiS* (number in sentence) – номер юнита в предложении; *SN* – номер предложения в тексте, к которому принадлежит юнит.

Множество синтаксических описаний определим следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Syn} = & \{ \text{syn}_i \mid \text{syn}_i = \\ & = (\text{SynN}, \text{SubS}, \text{syn}_j^1, \dots, \text{syn}_k^n) \}, \end{aligned}$$

где *SynN* (syntactic name) – имя синтаксической категории анализатора; *SubS* – упорядоченное множество синтаксических подкатегорий данного синтаксического узла

$$\text{SubS} = \{ \text{subs} \mid \text{subs} \in \text{Morph} \vee \text{subs} \in \text{Syn} \}.$$

Множество *SubS* упорядочено на основе порядка следования синтаксических элементов и слов в предложении. При этом ни один узел дерева не может быть собственным подузлом или подузлом его потомков. В общем виде множество категорий синтаксического анализатора можно записать как

$$\text{Kat}_{\text{syn}} = \text{Syn} \cup \text{Morph}.$$

Если синтаксический анализатор не поддерживает древовидное описание, то его нужно сгенерировать на основе включения категорий в подкатегории.

2. Функция отображения категорий синтаксического анализатора в категории интенсиональной логики:

$$\begin{aligned} f_{\text{отобр}} = & \{ (\kappa_{\text{syn}}, \kappa_{\text{logic}}) \mid \kappa_{\text{syn}} \in \text{Kat}_{\text{syn}} \wedge \kappa_{\text{logic}} \in \\ & \in \text{Kat}_{\text{logic}} \wedge (\kappa_{\text{syn}}, \kappa_{\text{logic}}) \in f_{\text{отобр}} \}, \end{aligned}$$

где *Kat_{syn}* – множество категорий синтаксического анализатора; *Kat_{logic}* – множество категорий интенсиональной логики.

Эта функция достаточно проста и может быть представлена в табличном виде для любого синтаксического анализатора со счётыным и конечным количеством синтаксических категорий, при этом данному условию соответствуют все реальные синтаксические анализаторы для действительно существующих ЕЯ [3].

3. Правила трансформации категорий в формулы. В общем случае правило трансформации можно представить в виде функции, в качестве параметров которой выступают имя синтаксиче-

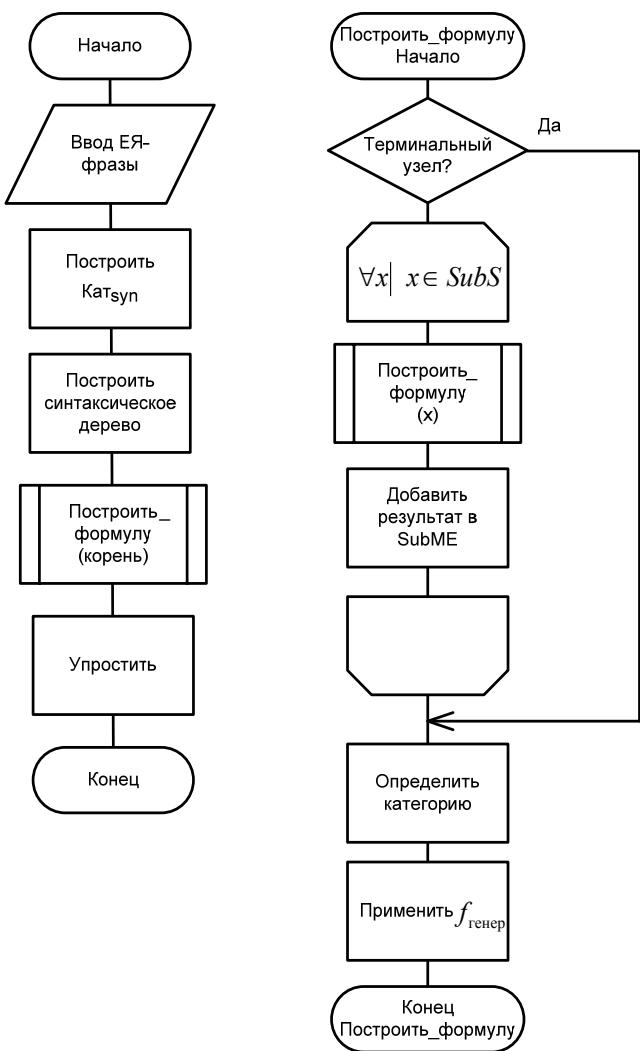


Рис. 1. Графическое представление алгоритма формализации смысла естественно-языковой фразы

ской категории и множество подформул данного узла. При этом подформулы будут выступать в качестве параметров для применения трансформации. Тогда функция генерации подформул примет вид

$$f_{\text{генер}} = \{(\text{Kat}_{\text{logic}}, \text{SubME}, \text{Form}) \mid \text{SubME} \subset \text{ME} \wedge \text{Form} \in \text{ME} \wedge (\text{Kat}_{\text{logic}}, \text{SubME}, \text{Form}) \in f_{\text{генер}}\},$$

где $\text{Kat}_{\text{logic}}$ – множество категорий интенсиональной логики (или их идентификаторов); SubME – множество подформул данного узла; Form – результирующая формула узла; ME – множество правильных формул языка интенсиональной логики.

Рассмотрим случай, когда $x \in \text{Morph}$ (назовём такой узел терминальным узлом дерева синтаксических категорий), тогда $\text{SubME} = \emptyset$ и функция генерации выродится в

$$\begin{aligned} f_{\text{генер}} &= \{(\text{Kat}_{\text{logic}}, \emptyset, \text{Form}) \mid \text{Form} \in \\ &\in \text{ME} \wedge (\text{Kat}_{\text{logic}}, \emptyset, \text{Form}) \in f_{\text{генер}}\} = \\ &= f_{\text{генер}}^{\text{atom}} = \{(\text{Kat}_{\text{logic}}, \text{Form}) \mid \text{Form} \in \\ &\in \text{ME} \wedge (\text{Kat}_{\text{logic}}, \text{Form}) \in f_{\text{генер}}\}, \end{aligned}$$

т. е. фактически станет отношением из множества синтаксических категорий во множество семантических обозначений этих категорий в пределах целевой системы. Такое отображение является основой рекуррентного определения функции генерации формул $f_{\text{генер}}$.

Функцию формализации ЕЯ-выражения представим в виде

$$f_{\text{форм}} = \{(\text{Kat}_{\text{syn}}, f_{\text{отобр}}, f_{\text{генер}}, \text{Form})\}.$$

Предполагая, что все тексты имеют сходное строение и должны отображаться в сходные выражения логики, можно исключить из числа параметров функции $f_{\text{отобр}}$, $f_{\text{генер}}$, считая их одинаковыми для всех операций формализации. Если процесс построения Kat_{syn} считать внутренним по отношению к функции формализации, то, упростив её, получим

$$\begin{aligned} f_{\text{форм}} &= \{(\text{Фраза}^{\text{ЕЯ}}, \text{Form}) \in \\ &\in \text{ME} \wedge (\text{Фраза}^{\text{ЕЯ}}, \text{Form}) \in f_{\text{форм}}\}, \end{aligned}$$

где $\text{Фраза}^{\text{ЕЯ}}$ – фраза на естественном языке.

Учитывая входные данные в пп. 1–3, графическое изображение алгоритма построения формул интенсиональной логики на основе дерева синтаксических категорий будет иметь вид, показанный на рис. 1.

Результатом данного алгоритма станет не только законченная формула интенсиональной логики, но и дерево категорий, породивших данную формулу. Это дерево может использоваться или перестраиваться для получения более адекватных формул на основе дополнительных правил.

Основная часть алгоритма (процедура Построить_формулу) – это рекуррентный обход дерева для построения подформул узлов. Ограничителями рекурсии служат терминальные вершины (листья дерева). Поэтому при правильно построенном дереве последовательность действий, описанная в данном алгоритме, всегда конечна. Среднее время создания формулы совпадает со средним временем обхода n -арного дерева и составляет $O(n)$ [4], где n – число узлов дерева синтаксических категорий, т. е. мощность множества Kat_{syn} . Более интересным представляется определение зависимости времени выполнения от количества

входных слов в ЕЯ-фразе. Но провести такую оценку затруднительно из-за следующих причин:

различие алгоритмов работы синтаксических анализаторов;

отсутствие прямой зависимости между количеством слов и мощностью множества Kat_{syn} ;

наличие нескольких «сочетаемых» элементов при создании Kat_{syn} .

Линейная временная оценка основывается на нескольких допущениях. Предположим, что создание множества Kat_{syn} атомарно (т. е. выполнимо за постоянное время), что не всегда так и сильно зависит от выбранного синтаксического анализатора, заполнения его словарей, количества этапов лингвистической обработки и т. д.

Данный алгоритм важен только тем, что процедура создания Kat_{syn} должна завершиться за конечное время, и её результатом будет правильно сформированное множество Kat_{syn} . Для оценки максимального порога времени этого шага можно измерять время, необходимое конкретному анализатору для создания множества Kat_{syn} при наборе достаточно больших предложений, которыми можно считать предложения более 100 слов. В реальных документах организаций обычно фигурируют более короткие предложения.

Второе допущение состоит в том, что временная сложность алгоритма, реализующего функцию $f_{\text{генер}}$, также постоянна для терминальных узлов и обсуждавшегося выше вырожденного случая, но такое допущение может быть не всегда верным по отношению к процедурной реализации данной функции.

Стоит отметить, что для реальных языковых данных (по крайней мере для русского и английского языков) максимальное количество элементов в $SubS$, а значит и элементов в $SubME$, равно трём. Причиной тому служит отсутствие отношений, определяемых единственным узлом с арностью, большей трёх. Таким образом, экспериментальная оценка времени обработки возможна для всего множества объектов категорий, реализованных на основе данного анализатора.

Следует сказать, что реализация операции упрощения – это не полное упрощение формулы до «неупрощаемого» состояния, а последовательное применение набора правил по преобразованию избыточной последовательности символов в последовательность символов меньшей длины, но сохраняющей эквивалентную интерпретацию.

Теория компиляции и интерпретации достаточно хорошо изучена и формализована [5]. Поэтому необходимо сосредоточиться непосредственно на интерпретации элементов языка интенсиональной логики, а не на способах синтаксического разбора формул интенсиональной логики и методов построения синтаксических деревьев таких формул.

Также необходимо учитывать, что формула, полученная на этапе формализации, может существовать в виде древовидной структуры и лишь для удобства пользователя может быть преобразована к виду, удобному для чтения. В этом случае этап синтаксического анализа формулы вовсе отсутствует.

Функция интерпретации является «внешней» по отношению к интерпретатору, который может использовать несколько таких функций. В логике Монтею каждая интерпретирующая функция инкапсулирует в себе картину мира, на основе которой проверяется гипотеза, представленная формулой из множества ME . При этом интерпретирующая функция содержит не только картину мира, но и интерпретацию фрагментов языка логики.

Рассмотрим пример такого дуалистичного поведения функции интерпретации. Пусть имеется формула

документ (№ 123) \wedge оплаченный (№ 123),

где № 123 обозначает сущность (тип e), т. е. объект однозначно определяемый и интерпретируемый. Все объекты сущностей предметной области образуют множество D_e , следовательно, № 123 $\in D_e$.

Монтею предлагает теоретико-множественное представление данных о предметной области. Тогда формула документ (№ 123) может быть интерпретирована таким образом: следует проверить принадлежность объекта с идентификатором № 123 к множеству документов. Если такая принадлежность имеет место, то результат интерпретации этого фрагмента равен 1 (причем $1 \in D_t$, где D_t – множество возможных результатов интерпретации формул). Фрагмент оплаченный (№ 123) интерпретируется абсолютно аналогично, с той лишь разницей, что проверяется принадлежность объекта № 123 множеству оплаченных объектов. Эти этапы могут быть успешно разрешены лишь на основе данных предметной области.

Иная ситуация возникает с применением формальных правил интерпретации. В логике Монтею синтаксические и семантические правила идут парами. Это значит, что использование синтаксического правила влечёт применение парного семантического правила. Тогда

$| \text{документ (№ 123)} \wedge \text{оплаченный (№ 123)} |^{M,w,t,g} = 1 \Leftrightarrow \text{одновременно}$

$| \text{документ (№ 123)} |^{M,w,t,g} = 1, | \text{оплаченный (№ 123)} |^{M,w,t,g} = 1.$

Таким образом, на уровне набора правил синтаксиса определяется и интерпретация служебных операций языка интенсиональной логики. Это ис-

ключает возможность реализации системы, основанием которой будет не двоичная, а например континуальная или нечёткая логика, которые признаны достаточно перспективными для области искусственного интеллекта. В этом случае функция интерпретации может интерпретировать атомарные объекты на основе предметной области, например

$$|\text{оплаченный } (\text{№ 123})|^{M,w,t,g} = 0,5.$$

Это может означать, что оплата на основании документа произведена частично и предприятию переведена только половина суммы. Но бинарная конъюнкция не может корректно обработать такие данные.

Для корректного применения функции интерпретации в технической системе необходимо разделение данных о состоянии мира и процедур интерпретации фрагментов языка логики. Это позволит применять единую функцию интерпретации для разных картин мира или разные функции на единой картине мира.

Конечно, интерпретация формулы на основе данных базы знаний (Б3) и языка должна быть согласована, т. е. если интерпретация атомарных единиц на основе Б3 происходит на основе нечёткой логики, то функции интерпретации элементов языка должны поддерживать работу с такими элементами. Но представленное разделение позволяет уменьшить ограничения, налагаемые на Б3, а также рассмотреть более удобное представление хранения интерпретирующих подфункций. Если интерпретирующие подфункции уровня языка удобно реализовывать в процедурном виде (например, в виде подпрограмм), то подфункции уровня представления имеет смысл рассматривать через призму взаимодействия с Б3.

Интерпретация правил картины мира требует более широкого толкования множества D_t . В общем случае можно считать, что $D_t = R$, где R – множество вещественных чисел. В каждом конкретном случае может производиться ограничение D_t .

Например, для информационного поиска удобно ограничить этот отрезок множеством вещественных чисел в отрезке $[0,1]$. Интерпретация правил уровня картины мира полностью совпадает с интерпретацией, предложенной Монтегю, но множество объектов в t в этом случае нужно считать не множеством истинностных значений, а скорее мерой этой истинности. Функция интерпретации на Б3 $f_{\text{interp}}^{\text{Б3}}$ может напрямую не обращаться к теоретико-множественной модели, но инкапсулировать в себе эмуляцию такого отображения на основе представления картины мира в конкретной Б3.

Пусть формула приведена в виде множества узлов FNS . Каждый узел представляет собой кортеж элементов (rule , nodeStr , $SFNS$), где rule – приме-

няемое синтаксическое правило; nodeStr – строковое представление узла; $SFNS$ – множество подузлов данного узла.

Тогда функция интерпретации на базе знаний $f_{\text{interp}}^{\text{Б3}}$ примет вид

$$\begin{aligned} f_{\text{interp}}^{\text{Б3}} &= \{(fN, \text{SetRes}_{\text{interp}}, f_{\Delta}^{\text{Б3}}, \text{res}_{\text{interp}}) | fN \in \\ &\in FNS \wedge (form, \text{SetRes}_{\text{interp}}, f_{\Delta}^{\text{Б3}}, \text{res}_{\text{interp}}) \in \\ &\in f_{\text{interp}}^{\text{Б3}}\}; \end{aligned}$$

$$\text{SetRes}_{\text{interp}} = \{\text{res}_{\text{interp}}^1, \dots, \text{res}_{\text{interp}}^n\},$$

где fN – узел синтаксического дерева формулы, для которого производится интерпретация; $\text{SetRes}_{\text{interp}}$ – упорядоченное множество результатов интерпретации всех подузлов интерпретируемой формулы; $\text{res}_{\text{interp}}^i$ – результат интерпретации i -й подформулы; $\text{res}_{\text{interp}}$ – общий результат интерпретации формулы; $f_{\Delta}^{\text{Б3}}$ – функция доступа к Б3.

Рассмотрим два случая доступа к Б3. Первый способ – доступ посредством набора атомарных действий. Такой способ чаще всего используется в старых Б3 и реализуется с помощью программных библиотек. Второй способ – доступ к Б3 с помощью языка запросов. Функцию доступа к Б3 можно описать как

$$\begin{aligned} f_{\Delta}^{\text{Б3}} &= \{(rule, \text{СП}) | (\text{СП} \in AtomO \vee \text{СП} \in \\ &\in QStr) \wedge (rule, \text{СП}) \in f_{\Delta}^{\text{Б3}}\}; \end{aligned}$$

$$AtomO = \{(o_1, \dots, o_n) | n \in N \wedge (o_1, \dots, o_n) \in AtomO\},$$

где $rule$ – синтаксическое правило, реализуемое узлом формулы; СП – способ доступа к Б3; $AtomO$ – множество кортежей атомарных операций взаимодействия с Б3, приводящих к необходимому результату; $QStr$ – выражение языка взаимодействия с Б3; N – множество натуральных чисел.

Интерпретацию правил уровня языка логики можно определить в виде функции

$$\begin{aligned} f_{\text{interp}}^{\text{lang}} &= \{(oper, \text{SetRes}_{\text{interp}}, \text{res}_{\text{interp}}) | oper \in \\ &\in AOp \wedge (oper, \text{SetRes}_{\text{interp}}, \text{res}_{\text{interp}}) \in \\ &\in f_{\text{interp}}^{\text{lang}}\}, \end{aligned}$$

где $f_{\text{interp}}^{\text{lang}}$ – функция интерпретации подформулы уровня языка; $oper$ – символьное обозначение операции; AOp – множество всех имён операций, определённых в данном варианте языка логики; $\text{res}_{\text{interp}}$ – общий результат интерпретации формулы; $\text{SetRes}_{\text{interp}}$ – упорядоченное множество результатов интерпретации всех подформул интерпретируемой формулы.

Типы $res_{interp}^i \in SetRes_{interp}$ могут как совпадать, так и различаться. При этом результат применения операции и её тип напрямую зависят от семантики операции.

Рассмотрим пример с бинарной конъюнкцией. В качестве operandов могут выступать следующие элементы: объект (тип e), множество (тип $a \rightarrow t$), истинностная оценка (тип t). Предполагая идемпотентность и коммутативность подобной операции, можно предложить следующие интерпретации (см. таблицу).

Реализация интерпретации бинарной конъюнкции

Тип первого операнда	Тип второго операнда	Тип результата	Интерпретация
e	e	$e \rightarrow t$	$ x_1 \wedge x_2 = \{ x_1 , x_2 \}$
$a \rightarrow t$	$a \rightarrow t$	$a \rightarrow t$	$ x_1 \wedge x_2 = \{ x_1 \cup x_2 \}$
t	t	t	$ x_1 \wedge x_2 = \min(x_1 , x_2)$ $ x_1 \wedge x_2 = \max(x_1 , x_2)$ $ x_1 \wedge x_2 = avg(x_1 , x_2)$

Множественность возможных интерпретаций истинностных оценок вызвана различными возможностями обработки оценочных значений в различных моделях. В целом можно сказать, что интерпретация формулы происходит на основе типов объектов, принадлежащих $SetRes_{interp}$.

Построим блок-схему интерпретации формулы интенсиональной логики (рис. 2).

Алгоритм представляет собой рекуррентный обход узлов дерева синтаксического анализа интерпретируемой формы. Результатом работы данного алгоритма может быть как объект (тип e) или множество (тип $a \rightarrow t$), так и истинностная оценка (тип t).

Среднее время интерпретации формулы совпадает со средним временем обхода n -арного дерева и составляет $O(n)$, где n – число узлов дерева синтаксических категорий (т. е. мощность множества FNS). Такая временная оценка строится из предположения атомарности операций синтаксического анализа формулы и процедур доступа к БЗ, что, конечно, не всегда так. Кроме того, не учитывается разница временной стоимости доступа к БЗ, которая является внешней по отношению к интерпретатору сущностью, и реализацией операций языка логики внутри интерпретатора. Но такие упрощения представляются допустимыми в силу сложности предсказания конкретных временных оценок этих операций и их зависимости от конкретных технических реализаций.

Таким образом, программная реализация изложенных алгоритмов даёт возможность построения системы автоматической семантической обработки

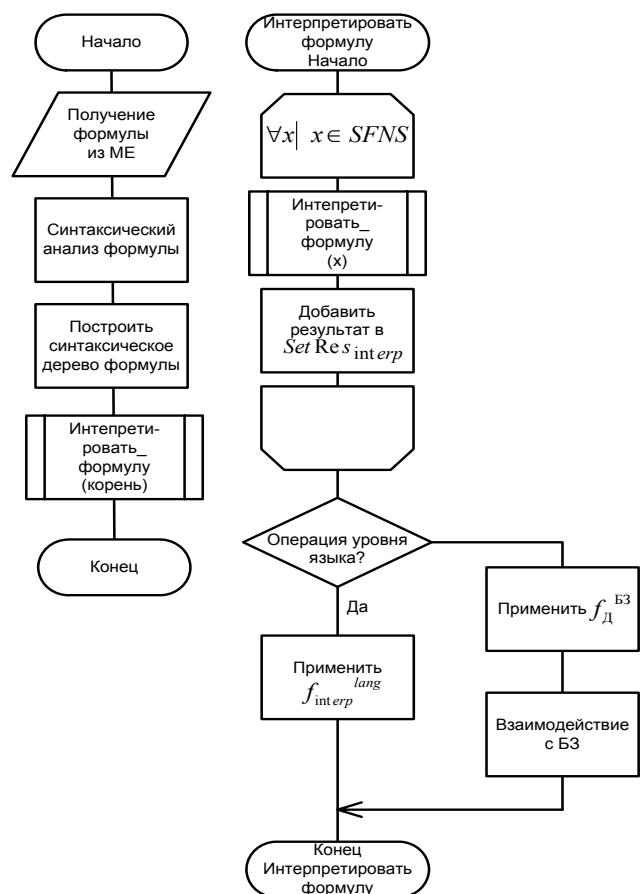


Рис. 2. Алгоритм интерпретации формулы интенсиональной логики

информации на основе формальной семантики. Алгоритм формализации смысла текста позволяет получить логическое представление предложений текста, а алгоритм интерпретации даёт возможность реализации логического вывода на множестве таких представлений. В зависимости от интерпретирующей функции на основе изложенных алгоритмов возможна реализация вопросно-ответных, поисковых и обучающих информационных систем.

Библиографические ссылки

1. Montague R. English as a Formal Language. In Visentini, Bruno et al. (eds.) Linguaggi nella società e nella tecnica. Milan: Edizioni di Comunità, 1970. P. 189–224.
2. Сокирко А.В. Морфологические модули на сайте www.aot.ru // Диалог-2004: тр. междунар. конф. М.: Наука, 2004. С. 559.
3. Летовальцев В.И., Швецов А.Н. Программная формализация естественного языка средствами формальной семантики // Программные продукты и системы. 2010. № 3. С. 85–90.
4. Introduction to algorithms / T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, C. Stein. 3-rd edition. Cambridge: The MIT Press, 2009. 1312 p.
5. Ахо А., Сети Р., Ульман Дж. Компиляторы: принципы, технологии и инструменты. М.: ИД «Вильямс», 2001. 769 с.

УДК 656.13:681.3

Е.А. Аникеев, канд. техн. наук, доц., **Н.Ю. Фёдоров**
 (Воронежская государственная лесотехническая академия),
О.Н. Черкасов, д-р техн. наук (ЗАО «ЛОТ», г. Воронеж)

eanikeev@gmail.com

АЛГОРИТМ ПОИСКА МАРШРУТА В ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ С УЧЁТОМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрены модель участка транспортной сети и алгоритм поиска маршрута при неопределённом времени движения. В качестве критерия оптимальности используется величина дохода от перевозки груза с учётом вероятностных характеристик времени движения автотранспорта по транспортной сети.

Ключевые слова: модель, автомобильный транспорт, мультиагентный алгоритм, неопределённость времени движения.

The model of a transport network section and route search algorithm at uncertain movement time are considered. The income size from cargo transportation is used as optimality criterion taking into account probabilistic characteristics of the motor transport movement time on a transport network.

Key words: model, motor transport, multiagent algorithm, movement time uncertainty.

Введение. Вопросы управления автотранспортными перевозками рассматривались в работах [1–3]. Однако здесь не учитывались вероятностные характеристики времени движения автотранспорта. Ниже предложена модель транспортной сети, являющаяся основой для алгоритма поиска маршрута автотранспорта при неопределённом времени движения. Модель обеспечивает адекватное представление структуры дорожной сети и вероятностные характеристики времени движения, а также возможность обновления данных.

Основная часть. Пусть $T = \{T_i\}_{i=1,\dots,N_T}$ – множество отрезков времени, на которые разбиты сутки; N_T – количество отрезков. Время модели транспортной сети поделено на дискретные отрезки, так как на практике используются именно интервалы времени, длину которых для почасового планирования можно принять равной 5 мин. Введём множество временных слоёв $L = \{L_i\}_{i=1,\dots,N_L}$, где N_L – количество временных слоёв. Также введём множество типов транспортных средств (ТС): $TTS = \{TTS_i\}_{i=1,\dots,N_{TTS}}$, где N_{TTS} – количество типов. Тогда описание дуги между i -й и j -й вершинами модели можно представить в виде кортежа

$$E_{ij} = \left\langle d_{ij}, f_{ij}(T, L), S_{ij}(TTS), C_{ij}(L, TTS), O_{ij} \right\rangle,$$

где d_{ij} – длина моделируемого участка; $f_{ij}(T, L) \rightarrow [0, 1]$ – закон распределения времени прохождения участка ТС эталонного типа для каждого временного слоя, S_{ij} ; $TTS \rightarrow (0, +\infty)$ – коэффициент замедления для каждого типа ТС; $C_{ij}(L, TTS)$ – ограничения на прохождение участка ТС; O_{ij} – описание физического размещения моделируемого участка дорожной сети.

Рассмотрим параметры, описывающие путь между двумя точками для некоторого ТС типа TTS_k . Отдельный участок транспортной сети, который входит в путь, описывается кортежем E_{ij} . В то же время весь путь является последовательностью таких участков. Следовательно, характеристики HW маршрута W от вершины v_0 до вершины v_{N_w} для ТС TTS_k в течение временного слоя L_q запишутся следующим кортежем:

$$\begin{aligned} HW\left(v_0, v_{N_w}, TTS_k, L_q\right) &= \\ &= \left\langle d_w, m_w, \sigma_w^2, C_w, O_w \right\rangle, \end{aligned}$$

где d_w – длина маршрута; C_w – ограничения, которым должно удовлетворять ТС для прохождения по маршруту; O_w – описание маршрута, предназначенное для генерации понятных водителю текстовых описаний.

Длина маршрута d_w является суммой длин всех его составляющих участков:

$$d_w = \sum_{i=0}^{N_w-1} d_{v_i, v_{i+1}}.$$

Для расчёта математического ожидания m_w и стандартного отклонения σ_w^2 прохождения маршрута воспользуемся формулами

$$m_w = \sum_{i=1}^{N_w} S_{v_{i-1}, v_i}(TTS_k) m_{v_{i-1}, v_i};$$

$$\sigma_w^2 = \sum_{i=1}^{N_w} S_{v_i-1, v_i}^2 (TTS_k) \sigma_{v_i-1, v_i}^2.$$

Ограничения C_w на ТС для прохождения маршрута должны быть наиболее свободными при условии, что удовлетворяющий им автомобиль может пройти каждый участок маршрута:

$$C_w = \langle CT_w, CH_w, CPM_w, CMO_w \rangle,$$

где $CT_w \in \{0,1\}$ – ограничение на время проезда ТС; $CH_w \in [0, \infty)$ – ограничение на высоту ТС; $CPM_w \in \in (0, \infty)$ – ограничение на полную массу ТС; $CMO_w \in \in (0, \infty)$ – ограничение нагрузки на ось.

Величина $CT_w \in \{0,1\}$ описывает разрешение проезда ТС типа TTS_k по маршруту W в течение временного слоя L_q . Значение 0 – запрет проезда, 1 – разрешение. Зависимость от L_q введена ввиду запрета на проезд для некоторых типов грузовых ТС в ночное время.

Эта величина определяется по формуле

$$CT_w = \prod_{i=0}^{N_w-1} CT_{v_i, v_i+1}.$$

Остальные ограничения вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} CH_w &= \min_{i=0, \dots, N_w-1} \{CH_{v_i, v_i+1}\}, \\ CPM_w &= \min_{i=0, \dots, N_w-1} \{CPM_{v_i, v_i+1}\}, \\ CMO_w &= \min_{i=0, \dots, N_w-1} \{CMO_{v_i, v_i+1}\}. \end{aligned}$$

Ограничение на скорость не входит в характеристики маршрута, так как на разных участках может поддерживаться разная скорость.

Ограничения на прохождение ТС по моделируемым участкам транспортной сети представим в виде кортежа:

$$\begin{aligned} C_{ij}(TTS, L) &= \\ &= \langle CV_{ij}, CT_{ij}(TTS, L), CH_{ij}, CPM_{ij}, CMO_{ij} \rangle, \end{aligned}$$

где $CV_{ij} \in [0, \infty]$ – ограничение на скорость ТС; $CT_{ij}(TTS, L) \rightarrow \{0,1\}$ – ограничение на тип ТС на каждом участке маршрута W при определённом временном слое L_q ; $CH_{ij} \in [0, \infty)$ – ограничение на высоту ТС; $CPM_{ij} \in [0, \infty)$ – ограничение на массу ТС; $CMO_{ij} \in [0, \infty)$ – ограничение нагрузки на ось ТС.

Возможно введение дополнительных ограничений.

Зададим полную модель дорожной сети:

$$RN = \langle T, TTS, L, V, E, V_{in}, V_{out} \rangle.$$

Множества T , TTS и L определены выше; $V = \{V_i\}_{i=1, \dots, N_V}$ – множество вершин дорожной сети; N_V – количество вершин; $V_{in} \subset V$ и $V_{out} \subset V$ – подмножества «входов» и «выходов» дорожной сети (въезды и выезды в сети города); $E = \{E_{ij} \mid V_i \in V, V_j \subset V\}$ – множество дуг, представляющих участки дорожной сети.

Отметим, что в данной модели регулируемые перекрёстки, переезды и прочие участки малой длины представляются не вершинами, а дугами, что позволяет упростить алгоритмы, основанные на данной модели.

Для применения предложенной модели обосновано вычисление математического ожидания времени прохождения автомобилем дуги E_{v_{i-1}, v_i} маршрута W и квадрата стандартного отклонения той же величины.

Разработана модель определения оптимальных критериев S_N^+ и S_N^- дохода от перевозки груза по заданному маршруту, которые вычисляются в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} S_N^+ &= N \sum_{\hat{t}_s \in dom(t_s)} p_s(\hat{t}_s) \times \\ &\quad \times \sum_{\hat{\tau} \in dom(\hat{\tau})} p_{\tau}(\hat{\tau}) q^+(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}); \\ S_N^- &= N \sum_{\hat{t}_s \in dom(t_s)} p_s(\hat{t}_s) \times \\ &\quad \times \sum_{\hat{\tau} \in dom(\hat{\tau})} p_{\tau}(\hat{\tau}) q^-(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}), \end{aligned}$$

где N – количество поездок в одинаковых условиях; d – длина пути; t_{\min} – время, ранее которого не следует начинать разгрузку автомобиля у клиента; \hat{t}_s – время начала поездки, представляющее собой дискретную случайную величину; $p_s(\hat{t}_s)$ – распределение вероятности; $\hat{\tau}$ – длительность поездки, также являющаяся дискретной случайной величиной с распределением вероятности $p_{\tau}(\hat{\tau})$; $\hat{t}_s \in dom(t_s)$ и $\hat{\tau} \in dom(t_s)$ – множество значений, принимаемых величинами \hat{t}_s и $\hat{\tau}$; q^+ и q^- – функции дохода, которые получают те из N автомобилей, которые начинают поездку в момент времени \hat{t}_s и находятся в пути в течение $\hat{\tau}$ интервалов времени.

В свою очередь,

$$q^+(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) = \begin{cases} 0, & \text{при } q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) < 0; \\ q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}), & \text{иначе} \end{cases}$$

$$q^-(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) = \begin{cases} 0, & \text{при } q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}) > 0 \\ q(d, t_{\min}, \hat{t}_s, \hat{\tau}), & \text{иначе} \end{cases}$$

Каждый маршрут характеризуется значениями S_N^+ и S_N^- , первое из которых тем больше, чем большая прибыль ожидается при следовании по маршруту W , а второй тем больше, чем возможен больший убыток. Для выбора из множества маршрутов можно строить множество Парето-оптимальных решений. Критерии оценки маршрута S_N^+ и S_N^- позволяют выбрать лучший маршрут из нескольких уже найденных. Для этого необходимо разработать соответствующий алгоритм.

Задача поиска оптимальных маршрутов по S_N^+ и S_N^- сводится к поиску маршрутов, оптимальных по характеристикам маршрута $HW = \langle d_w, m_w, \sigma_w^2, C_w, Q_w \rangle$ и исключению неоптимальных.

На основании приведённой выше модели транспортной сети разработан алгоритм поиска оптимального маршрута. Характеристики времени движения ТС по транспортной сети имеют вероятностный характер. Поэтому при поиске оптимального маршрута мультиагентный алгоритм является более эффективным, чем детерминированный.

Мультиагентный алгоритм поиска оптимального маршрута в транспортной сети позволит водителю выбрать экономичный маршрут от начала движения до места назначения. Кроме того, рассматриваемый алгоритм позволяет предоставить водителю и диспетчеру грузоперевозок данные о характеристиках оптимальных маршрутов между произвольными точками для планирования перевозок.

Введём в модель транспортной сети временные слои, позволяющие описывать каждый из интервалов времени, внутри которых интенсивность движения примерно одинакова. Также внутри каждого временного слоя введём множество целевых слоёв, по одному для каждого из узлов сети, описывающих точки погрузки/разгрузки (депо, заправочные станции и т. д.), т. е. те узлы, задание на движение к которым может получить водитель ТС. Узел, для которого создан данный целевой слой, назовём целевым узлом данного слоя.

В целевом подслое временного слоя создадим множество агентов для узлов дорожной сети. Каждый из агентов представим в виде кортежа (состояния):

$$A^i = \langle IN^i, OUT^i, Q^i, PAR^i, f^i \rangle,$$

где IN^i – множество индексов агентов, соответствующих тем узлам дорожной сети, которые связаны с заданным агентом A^i дугой, направленной в сторону агента A^i .

В свою очередь,

$$IN^i = \left\{ IN_k^i \mid \exists E IN_k^i, k \in E \right\}_{k=1, \dots, IN_k^i}.$$

Такие агенты будем называть входящими.

Аналогично OUT^i – множество индексов тех агентов, которые достижимы от целевого агента:

$$OUT^i = \left\{ OUT_k^i \mid \exists E OUT_k^i, k \in E \right\}_{k=1, \dots, OUT_k^i}.$$

Такие агенты будем называть исходящими.

Обозначим A^{Π} агента, до которого необходимо найти оптимальный маршрут. Далее будем называть его целевым агентом. Очередь сообщений, поступающих некоторому агенту A^i , обозначим Q^i . Эти сообщения представляют собой индексы тех агентов, изменение состояния которых требует пересчёта состояния данного агента. Обозначим пустую очередь таких сообщений знаком пустого множества \emptyset . Введём операции сравнения с пустой очередью, очистки очереди ($Q^i := \emptyset$), помещения сообщения в очередь ($Q^i \leftarrow q$) и извлечения из очереди ($Q^i \rightarrow q$). Агент посылает сообщения входящим агентам тогда, когда необходимо показать, что множество оптимальных маршрутов от него до целевого агента было по каким-то причинам изменено. Получение такого сообщения позволит адресату привести множество оптимальных маршрутов в актуальное состояние.

Представим в виде кортежа множество характеристик оптимальных по HW маршрутам от агента A^i до целевого агента данного слоя A^{Π} , с информацией о том, через какой из агентов, смежных с данным, он проходит:

$$PAR^i = \langle j, HW(i, j, \dots, \Pi) \rangle,$$

где $j \in OUT^i$.

Функция f^i в кортеже, описывающем агента A^i , является потоком выполнения данного агента. На каждом шаге работы агента она преобразует текущее состояние в новое состояние агента, а также рассыпает сообщения другим агентам.

В начале работы алгоритма кортежи IN^i и OUT^i каждого из агентов A^i установлены в соответствии со структурой дорожной сети. Разрабатываемый алгоритм не изменяет эти множества. Очередь сообщений Q^i и множество PAR^i пусты.

Для начала расчётов необходимо от целевого агента данного слоя A^{Π} разослать сообщения всем

входящим агентам (их индексы находятся во множестве IN^{Π}). В дальнейшем целевой агент никаких действий не выполняет и не реагирует на поступающие сообщения.

Целью каждого из агентов A^i является помещение в PAR^i характеристик оптимальных по параметрам кортежа HW маршрутов до целевого агента A^{Π} .

Рассмотрим работу алгоритма поиска маршрута, заключающуюся в выполнении следующих действий.

1. Ожидание и приём сообщений характеристик оптимальных по параметрам кортежа HW маршрутов до целевого агента.

2. Пересчёт множества PAR^i .

3. Рассылка сообщений входящим агентам (из множества IN^i), маршруты которых могут измениться в результате изменения PAR^i .

Чтобы ответить на вопрос п. 3 – изменился ли маршрут от агента A^k ($k \in N^i$), проходящий через агента A^i , надо проделать следующие действия:

из предыдущего множества PAR^i исключить те маршруты, в которых принимает участие агент k (наличие таких маршрутов вполне возможно, так как агенты могут быть связаны двумя разнонаправленными дугами, т. е. возможна ситуация, когда $k \in N^i$ и $k \in OUT^i$;

проделать ту же операцию с текущим PAR^i (т. е. полученным после пересчёта);

сравнить их. Если они отличаются, то маршруты от A^k до A^{Π} через A^i могут измениться (т. е. следует послать сообщение $Q^j \leftarrow i$).

Результатом является множество оптимальных по параметрам кортежа HW маршрутов.

Результатом работы прямого хода алгоритма является заполнение множества PAR^i каждого агента, что позволяет определять характеристики оптимальных маршрутов от произвольной вершины данного слоя до целевой. Для получения собственно маршрута, т. е. последовательности вершин от заданной до целевой, необходимо проделать обратный ход.

Входными параметрами обратного хода алгоритма являются индекс i вершины начала маршрута; функция распределения вероятности времени начала движения $p_s(t_s)$; максимально допустимое математическое ожидание m_{\max} и квадрат стандартного отклонения σ_{\max}^2 времени движения по маршруту; функция $q_t(t)$ оплаты услуг перевозчика в зависимости от времени прибытия и минимальное время начала обслуживания t_{\min} ; параметры ТС, описываемые кортежем:

$$TS = \langle TTS_q, c_d, c_{\tau}, H, M_{\text{полн}}, M_{\text{ось}} \rangle,$$

где $TTS_q \in TTS$ – тип ТС; c_d – затраты на километр маршрута; c_{τ} – затраты на единицу рабочего времени;

H – высота ТС; $M_{\text{полн}}$ – полная масса ТС; $M_{\text{ось}}$ – нагрузка на ось ТС.

Кроме указанных выше входных параметров, используются параметры W_0 и HW_0 , необходимые для организации рекурсии. Параметр W_0 хранит последовательность вершин от начальной до i -й (например, когда $i = \Pi$, маршрут W_0 является искомым).

Обратный ход алгоритма работает следующим образом. На каждом этапе из всего множества маршрутов, полученных при выполнении прямого хода алгоритма (оптимальных по параметрам кортежа HW), от заданной до целевой точки выделяется подмножество маршрутов, Парето-оптимальных по критериям S_N^+ и S_N^- . Точка, смежная с заданной и входящая в множество Парето-оптимальных по критериям S_N^+ и S_N^- , помещается в промежуточное множество вместе со значениями соответствующих критериев.

На следующем этапе для каждой точки, входящей в множество CRIT, порождается рекурсивный процесс, повторяющий эти же этапы, пока не будет достигнута целевая точка.

Достижение целевой точки является признаком того, что искомый маршрут построен полностью и заносится в множество оптимальных маршрутов, а данная ветвь рекурсии прекращается. Алгоритм заканчивает работу тогда, когда отработаны все ветви рекурсии.

Заключение. Рассмотренная модель транспортной сети учитывает, в отличие от известных моделей, вероятностные характеристики движущегося по ней автотранспорта, в частности неопределённость времени прохождения каждого из участков сети. Оптимальность маршрута определяется критериями доходности S_N^+ и S_N^- . Отметим, что расчёт этих критериев в каждой точке маршрута не является необходимым, и возможно построение версии алгоритма с вычислением их только в начальной точке. Это уменьшит нагрузку на вычислительную технику при работе алгоритма. В представленной версии алгоритма это не учтено из-за того, что данный алгоритм выполняется достаточно быстро, а вызывается достаточно редко, поэтому необходимость в таком улучшении не возникает.

Библиографические ссылки

1. Вельможин А.В., Гудков В.А., Миротин Л.Б. Технология организации и управление грузовыми автомобильными перевозками: учеб. для вузов. Волгоград: Волгоградский гос. техн. ун-т, 1999. 296 с.
2. Луканан В.Н., Буслаев А.П. Автотранспортные потоки и окружающая среда. М.: ИНФА, 2001. 646 с.
3. Черкасов О.Н., Аникеев Е.А. Системы MRP/ERP, CSRP; проблемы их применения и развития в решении задач управления автотранспортными предприятиями // Приводная техника. 2006. № 6 (64). С. 38–43.



ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

УДК 621.002.51

По страницам журналов

Метод оценки трибологических и трибоспектральных характеристик наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 10.

Описан метод оценки трибологических и трибоспектральных характеристик наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения. Метод основан на использовании методик трибоспектральной идентификации и физико-математического моделирования трибосистем. Показано, что использование системы интегральных оценок амплитудо-фазочастотных характеристик позволяет идентифицировать и прогнозировать состояние фрикционного контакта.

Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 10.

Представлен анализ особенностей статических методов, показаны актуальные научные и практические задачи в области отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. Показано, каким образом эти и другие задачи решаются при создании патентов.

Повышение износстойкости деталей нанесением меди на поверхность при обкатывании с гидроприводом. Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 10.

Представлены результаты исследований обкатывания деталей деформирующим шаром через слой жидкости. Показана возможность увеличения износстойкости деталей нанесением медных покрытий при упрочняющей обработке обкатыванием с гидроприводом. Разработан способ совмещённой обработки деталей точением и обкатыванием с гидроприводом, обеспечивающий нанесение меди на изделие из алюминиевых сплавов.

Использование эффекта Л.А. Юткина в электрогидравлических устройствах. Автомобильная промышленность. 2011. № 11.

На основании электрогидравлического эффекта (ЭГЭ), более известного как «эффект Юткина», разработана конструкция электрогидравлического отбойного молотка, по сути ЭГЭ-перфоратора, имеющего высокую надёжность и КПД (по сравнению с известными аналогами). Его использова-

ние позволит автоматически регулировать силу и частоту ударов; снизить повышенную шумность, свойственную пневмо- и бензоотбойникам; не создавать угрозу экологической обстановке. Была создана лабораторная установка ЭГЭ-перфоратора, на которой был апробирован принцип его действия и сняты рабочие характеристики.

Мировой опыт кластеризации автомобильной промышленности. Автомобильная промышленность. 2011. № 11.

Развитие экономики любого государства связано с обеспечением конкурентоспособности его промышленности. И одной из новых технологий обеспечения конкурентоспособности последней является её кластеризация. Автомобилестроение с этой точки зрения – не исключение. Поэтому в статье рассмотрены различные модели кластеров, а также возможность их применения в России.

Автоматизированная система термопрочностных расчётов керамических режущих пластин. Вестник машиностроения. 2011. № 11.

Представлена автоматизированная система термопрочностных расчётов керамических режущих пластин с использованием микроструктурной и математической моделей, позволяющая исследовать тепловое и напряжённо-деформированное состояние режущих пластин под действием внешних нагрузок с учётом структурной неоднородности керамики.

Физические основы разработок наноструктурных покрытий для режущего инструмента. Вестник машиностроения. 2011. № 11.

Изложены основы разработок наноструктурных покрытий для режущего инструмента. Представлены результаты моделирования межатомного взаимодействия различных систем, используемых в качестве мишеней при осаждении покрытий, дана оценка прочности их связей с твёрдо-сплавной основой.

Математическое моделирование упругих перемещений технологической системы при торцевом фрезеровании с учётом износа инструмента. Вестник машиностроения. 2011. № 11.

Разработана двухфакторная математическая модель упругих перемещений вершины зуба торцевой фрезы в направлении выполняемого размера, учитывающая взаимные угловые перемещения элементов системы.