

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
И ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ**

48

ВЫПУСК

Министерство высшего и среднего
специального образования УССР

Харьковский институт радиоэлектроники

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ

ВЫПУСК 48

Республиканский
межведомственный
научно-технический
сборник

Основан в 1964 г.



508 416

Харьков
Издательство при Харьковском
государственном университете
издательского объединения „Вища школа”
1978

УДК 62--50

Автоматизированные системы управления и приборы автоматизации, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков издательское объединение «Вища школа», 1978. 150+6 с.

В сборнике представлены материалы об эффективности, оптимизации и структуре АСУ. Рассматриваются вопросы, связанные с алгоритмизацией, математическим обеспечением, а также с использованием технических средств АСУ. Приведены результаты теоретических и практических работ по автоматизации управления промышленными предприятиями. Описаны конструкции приборов и устройств автоматизации.

Рассчитан на специалистов в области технической и экономической кибернетики.

Списки лит. в конце статей.

Редакционная коллегия: И. В. Кузьмин (отв. ред.), Е. Я. Иванченко (зам. отв. ред.), И. Ф. Огороднейчук (отв. секр.), Э. А. Дедиков, А. В. Дабаян, А. Г. Евдокимов, А. Н. Ефимов, Ф. А. Катков, К. Д. Коноваленко, Н. Ф. Когляренко, И. К. Кучеров, В. П. Оголюк, Э. Г. Петров, В. В. Свиридов, Ю. Г. Стоян, В. Ф. Шостак.

Адрес редакционной коллегии:

310059, Харьков-59, пр. Ленина, 14, институт радиоэлектроники, кафедра системотехники, тел. 40-94-32.

Редакция научно-технической литературы

УДК 62—506

Функциональная иерархия и организация. Алексеев О. П. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 2—5.

Исследуются вопросы анализа систем организационного типа. Вводится формализованное описание структур различных классов организаций. Предлагается последовательность действий при синтезе новой или модернизации существующей организации.

Список лит.: 2 назв.

УДК 62—506

Обобщенный алгоритм управления объектами организационно-технического типа. Алексеев О. П. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 5—7.

Рассматривается задача управления объектами, которые входят в состав организационных систем. Предлагается методика и алгоритм управления, применимые в технических и организационных системах.

Список лит.: 3 назв.

УДК 621.34 : 621.3.077.6

Синтез иерархической модели объекта управления на основе анализа его организационной и функциональной структур. Гвоздинский А. Н., Моднов В. П. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 7—11.

Предлагается процедура построения обобщенной организационно-функциональной структуры, осуществленная при решении комплекса задач технической подготовки производства в рамках производственного объединения.

Ил. 4. Список лит.: 3 назв.

УДК 007 : 519. 76

Об уточнении понятия «ценность экономической информации». Ашеро́в А. Т., Кошель Т. В. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 11—16.

Рассматривается экспликация понятия «ценность экономической информации» через многоуровневую структуру понятий отдельных свойств и качеств информации. Предложенная формализация ориентирована на исследование информационных процессов в банках данных.

Ил. 3. Список лит.: 2 назв.

УДК 007 : 658.012.011.56

Обобщенная концепция ценности экономической информации, ориентированная на моделирование процессов хранения. Ашеро́в А. Т., Кошель Т. В. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 17—22.

Предлагается подход к построению обобщенной концепции ценности информации в банках данных. На основе композиции целевого и структурного уровней описания сформулированы основные положения по построению концепции.

Ил. 2. Список лит.: 3 назв.

УДК 62—5:002

Приведение записей переменной длины с использованием дескриптора. Гулиус В. А. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 22—28.

Показано, что приведение записей переменной длины с использованием дескриптора существенно повышает эффективность использования вычислительных средств при обработке больших массивов. Получена формула для величины удельной избыточной информации. Приведена сравнительная оценка предлагаемого способа приведения с известными.

Табл. 2. Ил. 1. Список лит: 2 назв.

УДК 621. 391

Выбор показателя эффективности информационных моделей. Пятков Ю. П., Акимов А. П., Сизов В. М. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков. издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 28—31.

Рассматриваются вопросы выбора показателя эффективности информационных моделей на основании задач, решаемых операторами пункта управления исходя из условий минимизации потерь во времени, решения задач и количества допущенных ошибок для выбранного варианта распределения информации между устройствами отображения.

Список лит.: 3 назв.

УДК 62—50

Методы параметрической идентификации технологических процессов. Авраменко В. П. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 31—45.

Приведены основные задачи функциональной, параметрической и функционально-параметрической идентификации. Для оценивания параметров использован метод максимального правдоподобия и метод наименьших квадратов. Выведены рекуррентные соотношения для текущего оценивания параметров. Программы и алгоритмы реализованы на конкретных объектах.

Список лит.: 3 назв.

УДК 62—50

К вопросу параметрической идентификации плохо обусловленных систем. Авраменко В. П. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 45—59.

Предложены инженерные и научные методы оценивания числа обусловленности по Тодду. Для плохо обусловленных систем разработаны алгоритмы параметрической идентификации с использованием стохастической аппроксимации и безусловной минимизации целевой функции. Алгоритмы реализованы на конкретных объектах и сданы в Республиканский фонд алгоритмов и программ УССР

Список лит.: 6 назв.

УДК 330.115

Описание алгоритма анализа документооборота с помощью ЭВМ Киренко Л. А., Шагаев Ю. В. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 59—64

Показано, что анализ документооборота при помощи программы значительно упрощает этот трудоемкий процесс, сокращает сроки анализа и дает возможность систематизировать информацию по функциональной принадлежности и видам обрабатываемой информации.

Табл. 1. Ил. 1. Список лит.: 3 назв.

УДК 681.3.06

Алгоритмы преобразования полноскобочной формы записи в бесскобочные Яценко Г. А. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 64—67.

Приводятся алгоритмы преобразования полноскобочной формы записи математических операторов в бесскобочные; префиксную и постфиксную строки. Первый алгоритм представлен двухленточной машиной Тьюринга с двумя головками и набором правил управления головками, заданными в форме нормального алгоритма. Второй алгоритм представляет собой упорядоченный набор операторов присвоения, выполняемых последовательно. Для каждого алгоритма дается пример, иллюстрирующий процесс преобразования динамической изменения служебных переменных и строк математических операторов в ходе преобразования.

Библиогр. ссылка в подстроч. примеч.

УДК 681.321.11

Устройство сопряжения цифрового измерительного прибора с перфоратором Корытцев И. В., Прошкин Е. Г., Ульянов Ю. Н. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 67—70.

Описывается устройство для автоматического вывода данных цифрового измерительного прибора, поступающих в параллельном двоично-десятичном коде, на перфоленту. Устройство позволяет значительно сократить время подготовки больших массивов цифровых данных для статистической обработки в ЭВМ.

Ил. 2.

УДК 65. 012. 122

Методика прогнозирования постепенных отказов систем автоматики в процессе производства и эксплуатации. Беседин А. С. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 70—76.

Разработан рабочий аппарат для индивидуального прогнозирования постепенных отказов систем автоматики. Задача решается аналитическим методом с использованием неразрушающих испытаний изделий.

Табл. 1. Ил. 3. Список лит.: 5 назв.

УДК 656.259.12

Расчет режимов работы реактивных рельсовых цепей при помощи ЭВМ.

Глущенко В. П., Горяинова Т. С. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 76—84.

Проводится разработка алгоритма и составляется программа для расчета режимов работы реактивных рельсовых цепей при помощи ЭВМ «Наирн-К».

Ил. 3. Список лит.: 3 назв.

УДК 621.391.833

Некоторые вопросы построения адаптивных устройств обнаружения сигналов на фоне импульсных помех в автоматизированных системах управления. Хорошко В. А., Чирков Д. В. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 84—87.

Рассматривается принцип построения адаптивного алгоритма обнаружения сигнала на фоне шума и импульсной помехи в автоматизированных системах управления. Предложена функциональная схема адаптивного алгоритма и его схемная реализация. Рассмотрены вопросы опознавания и оценки параметров импульсной помехи.

Ил. 3. Список лит.: 4 назв.

УДК 621.391:519.47

Алгоритм параметрической оптимизации преобразователей информации автоматизированных систем управления. Логвина Н. И., Хорошко В. А., Чирков Д. В. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 88—92.

Рассматривается решение задачи параметрической оптимизации качества (параметрический синтез при выбранной структуре) измерительной схемы. В качестве примера взят алгоритм выбора оптимальных параметров измерительной схемы, синтезированной на базе последовательного функционального преобразователя.

Ил. 2. Список лит.: 2 назв.

УДК 612.82.014.42.001.57

Сопряжение вероятных подсистем пространственно-временных связей с детерминированными функциями АСУ. Колотенко Г. А., Евтушенко Г. И., Диденко С. Ю. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 92—99.

Анализируются переменные пространственно-временные организации синхронных и асинхронных связей головного мозга человека-оператора АСУ при афферентных раздражителях, в частности при психофизиологическом воздействии, что позволяет моделировать особенности биоэлектрических межцентральных отношений различных областей головного мозга. Моделируются пространственно-временные особенности интегративных и дифференциальных свойств головного мозга человека при норме. Раскрываются объективные вероятные особенности функционирования головного мозга, которые необходимо учитывать при сопряжении электрофизиологических показателей оператора АСУ с входными параметрами АСВТ.

Список лит.: 3 назв.

УДК 612.82.014.42.001.57

Системно-кибернетический подход к анализу вероятных подсистем связей — неотъемлемых звеньев АСУ. Колотенко Г. А., Евтушенко Г. И., Диденко С. Ю. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 100—107.

Освещаются особенности автоматически дифференцируемых подсистем пространственно-временных связей, входящих иерархическими звеньями в автоматизированные системы управления. В связи с развитием систем человек-машина материал статьи актуален, имеет научную и практическую ценность.

Список лит.: 4 назв.

УДК 681.015.24

Многоуровневый подход в задачах разработки (конструирования) оптимального математического описания управляемых технологических комплексов. Шостак В. Ф., Петров Г. Н. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 107—114.

Показана методика формирования уровней описания управляемых подсистем в соответствии с системным критерием, учитывающим потери и затраты, при случайном изменении возмущающих воздействий и постоянных коэффициентов. Оптимальный уровень описания определяется оптимальным значением управляющих воздействий, периода принятия решения и идентификации, что подтверждается примером, рассмотренным в статье. Дана расшифровка затрат и на основании предложенной методики синтезирован алгоритм многоуровневого конструирования модели. Данная методика позволяет создавать оптимальную модель по системному критерию.

Табл.1. Ил. 1. Список лит.: 6 назв.

УДК 681.3.06

Алгоритм преобразования математических операторов из инфиксной в полноскобочную форму записи. Яценко Г. А. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 114—116.

Приводится алгоритм преобразования математических операторов, без логических операций, из инфиксной в полноскобочную форму записи. Алгоритм представлен в виде двухленточной машины Тьюринга с четырьмя головками и системой правил управления головками, заданной в виде упорядоченного набора секвенций. На первой ленте записан преобразуемый математический оператор в инфиксной форме, на второй — формируется математический оператор в полноскобочной форме записи. Приводится пример, иллюстрирующий динамику изменения переменных в ходе преобразования.

Табл. 1. Список лит.: 2 назв.

УДК 658.012

Принципы построения универсальной программы для расчетов материальных и тепловых балансов некоторых производств основной химии. Зозуля А. Ф. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 117—127.

Разработана блок-схема универсальной программы моделирования химико-технологических систем (ХТС) для использования ее в системе проектирования. Применен модифицированный операторный метод моделирования процессов, позволяющий создать универсальную программу, которая исключит необходимость разработки библиотеки процессов. Программа предусматривает анализ ХТС по процессам в заданных ограничениях, неизвестных без выделения рецикловых блоков.

Ил. 3. Список лит.: 11 назв.

УДК 65.012

Об одном алгоритме анализа электрических цепей контрольно-измерительных приборов. Зозуля А. Ф., Асеев Г. Г. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 127—133.

Описан разработанный алгоритм решения системы линейных и нелинейных уравнений с применением теорий графов. Решение такой системы строится на основе матрицы смежности двудольного информационного графа (ДИГ). Циклическая структура матрицы смежности ДИГ приводится к ациклической

путем анализа ее по столбцам. Приведенный алгоритм может быть легко формализован для решения систем уравнений на ЭВМ.

Табл. 7. Ил. 2. Список лит.: 4 назв.

УДК 621.9

Автоматизация процесса выбора оптимального варианта сборки функционального узла РЭА по точностному критерию. Салоп Г. А., Милютин Н. В. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 133—138.

Решена задача выбора оптимального метода сборки функциональных узлов РЭА по точностному критерию с учетом статистического распределения значений внутренних параметров. Разработанный алгоритм решения задачи позволяет получить решение практически для функциональных узлов и блоков РЭА любой сложности.

Ил. 1. Список лит.: 3 назв. •

УДК 62—501.7

Система целеобразующих принципов для задач принятия решений. Кухарев Б. Е. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 138—142.

Рассматривается задача выбора решений в многокритериальных (многофакторных) ситуациях. Получена полная система принципов целеобразования для этих ситуаций, состоящая из трех принципов. Показано, что каждому принципу соответствует особый тип функции многокритериальной полезности.

Табл. 1. Список лит.: 2 назв.

УДК 62—501.7

О функции многокритериальной полезности. Кухарев Б. Е. Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, вып. 48. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, с. 143—148.

Рассматривается возможность принятия решений при многих критериях путем формирования функции многокритериальной полезности. Предлагаются две дополнительные аксиомы к аксиомам Неймана—Моргенштерна и на их основе определяется вид функции многокритериальной полезности для общего случая. Обсуждается понятие зависимости критериев по полезности.

Список лит.: 9 назв.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИЕРАРХИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ

Системам организационного управления и контроля свойствен иерархический характер построения структуры. Количество уровней иерархии — один из параметров, определение которого имеет большое значение для решения задачи синтеза и анализа организации.

Следует различать многоуровневое построение организационной структуры, обусловленное сложностью информационного характера процессов функционирования исследуемого класса систем, и собственно иерархию, или подчиненность, связанную со спецификой организационного управления и контроля.

Рассмотрим задачу определения числа уровней иерархии в организации с учетом этого различия.

Анализ, проведенный в ряде исследований, например в работе [1], позволяет сделать заключение, что множество структурных построений различных организаций можно классифицировать как линейную, линейно-советующую (штабную) и матричную структуры. В их состав входит три типа элементов: руководство, исполнение, советующий элемент.

Для решения поставленной задачи проведем следующую формализацию. Обозначим элемент руководства символом P , исполнения — U , советующий элемент — C , структуру — S . Если структуры не существует, то $S = 0$.

Введем понятие операции добавления $(+)$, уменьшения $(-)$, операции связи $(\rightarrow)$. Операция $+$ $(-)$ означает введение в организационную структуру дополнительных элементов, $(\rightarrow)$ оценивает иерархическую подчиненность элементов. Последовательность операций определяют скобки как средство формирования групп элементов. Тогда

$$S_{\text{л}} = P \rightarrow U; S_{\text{ш}} = (P \rightarrow C) \rightarrow U; S_{\text{м}} = \\ = (P \rightarrow U) + \dots + (P \rightarrow U), \quad (1)$$

где $S_{\text{л}}$ — линейная структура; $S_{\text{ш}}$ — штабная структура; $S_{\text{м}}$ — матричная; $(=)$ — знак эквивалентности.

Допустим, что всякое добавление элементов одного типа не изменяет функции группы этих элементов, т. е.

$$P + P = P; U + U = U; C + C = C. \quad (2)$$

Следствием из выражения (2) является то, что структура S существует только в случае, если имеется хотя бы один элемент P и элемент U , так как любое качество P или U , добавление C не меняют качество группы элементов, а структура — не только количественное, но и качественное построение. Элемент, введенный в структуру, имеет характеристики, отличные от тех, которые он мог бы иметь в другой структуре. Можно записать

$$S = 0, \text{ если } P = 0 \text{ или } U = 0. \quad (3)$$

Следует отметить, что при $C = 0$ структура $S = 0$ только в том случае, если выполняется одно из условий в выражении (3).

На основании формул (2), (3) можно утверждать, что тип структуры (линейная, штабная, матричная) определяет не более двух уровней иерархии — руководства и исполнения. Из модели (1) следует: всякая структура является производной от линейной; принципиально отличается только линейно-советующая структура, а матричная является развитием линейной структуры.

Таким образом, потенциально всякая организационная структура имеет два функциональных уровня: исполнение и руководство, так как советующий элемент в линейно-советующей структуре находится на уровне руководства и его можно записать как

$$(P \rightarrow C) = P. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что всякая структура построена с учетом взаимодействия элементов руководства и исполнения.

При анализе существующей и создании новой организации приходится решать задачу декомпозиции многоуровневой структуры. Если к ней подходить, как к выделению отдельных модулей-функциональных уровней, целесообразно использовать предлагаемый нами подход. Информационный анализ позволяет исследовать многоуровневое построение как совокупность отдельных самостоятельных модулей [2], формирование этих модулей связано с объединением групп элементов.

Несмотря на многообразие исполнительных элементов в организации, с точки зрения иерархической подчиненности у них есть общее качество — отсутствие линий подчиненности, т. е. есть только входящие $\rightarrow$. Поэтому, решая задачу декомпозиции организационной структуры, можно найти элементы исполнения. Для элементов же руководства задача декомпозиции более сложная.

Руководство организацией выполняют функции управления. К ним относятся планирование, управление и регулирование, оперативное планирование и управление. Поэтому потенциально двухуровневая организационная структура описывается формулой

$$S = P_{\Pi} \rightarrow P_y \rightarrow P_p \rightarrow U, \quad (5)$$

где P_{Π} , P_y , P_p — элементы руководства, осуществляющие соответственно функции планирования, управления и регулирования. Таким образом, структура (5) — четырехуровневое построение.

Количество уровней нельзя уменьшить функционально. Этого можно достичь в результате организационных мероприятий, совмещения функций планирования и управления. На практике данные функции, как правило, совмещаются. В небольших организационных коллективах обходятся одним элементом руководства, но это не всегда удобно, так как математические модели планирования, управления и регулирования различаются. Поэтому с технической точки зрения в организации всегда необходимы три уровня руководства. «Физически» они могут быть реализованы в одном лице, что необходимо учитывать при анализе. В связи с этим рекомендуем следующую последовательность действий при синтезе новой или совершенствовании настоящей организации: определение элементов исполнения; группирование элементов по специфике задач; анализ задач планирования, управления и регулирования в группах; определение на основании проведенного анализа числа элементов руководства; формирование структуры отдельных уровней как модулей организации.

Список литературы: 1. Зеленовский Я. Организация трудовых коллективов. М., «Прогресс», 1971. 311 с. 2. Кузьмин И. В., Алексеев О. П. Особенности оценки эффективности систем контроля организационного типа. — В кн.: Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Вып. 38. Харьков, 1976, с. 7—11.

УДК 62—506

О. П. АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук

Харьковский автомобильно-дорожный институт

ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ТИПА

Развитие методов и средств вычислительной техники, автоматизация управления организационными и техническими объектами изменили основные характеристики организационных систем. Теперь это не только системы, в которых в качестве управляемых и управляющих элементов трудятся люди, а комбинированные объекты, где работают коллективы исполнителей и группы административного управления, а также технические устройства, автоматы. Можно утверждать, что «вскоре настанет время, когда любая инженерная разработка, которая может быть формализована, будет самоулучшаться при помощи адаптивного процесса», «большую часть разработки изменяет и дорабатывает машина» [1]. Требуется качественно новый подход к проблемам управления этими системами.

В общем случае анализ элементов исследуемого класса систем нельзя провести с позиции классического подхода, так как это не «автоматы, реагирующие на некоторые стимулы посредством точно определенных реакций [2]», а объекты, поведение которых

зависит от состояния внешней среды и от внутренней структуры, предыстории развития, и их реакции на возмущения практически не однозначны. Дальнейшая декомпозиция этих систем не всегда осуществима. Поэтому к ним применимы обобщенные методы математического анализа и синтеза.

Таким образом, решение задачи управления организации следует рассматривать как синтез обобщенного алгоритма управления ее организационными подразделениями и техническими объектами.

Рассмотрим такой алгоритм. Для объектов организационного типа это последовательность инструкций, для технических устройств — такая же последовательность, уровень описания которой формализован.

Приведем перечень мероприятий, регламентирующих работу организационных объектов: 1) определение и распределение плановых заданий исполнителям; 2) определение влияния каждого исполнителя на выполнение плана в целом; 3) нахождение на основании этого влияния сроков отчетности исполнителей; 4) анализ реального хода работ; 5) выявление причин несоответствия реального и планового уровней выполнения заданий исполнителями; 6) выбор режима работы исполнителей, компенсирующего возникшее отклонение.

Алгоритм управления техническим объектом, идентичный организационному, имеет следующий вид: 1) формирование решаемой (выходной) функции

$$y(t) = y[k_i, t], \quad (1)$$

где $y(t)$ — образ решаемой функции; y — оператор исследуемого объекта; k_i — первичный параметр i ($i = \overline{1, n}$) объекта; t — текущее время на интервале $[t_0, t_1]$, соответствующий плановому интервалу $T_{пл}$ организации; 2) расчет весовых функций параметров W_i ; 3) определение моментов контроля t_{k_i} по условию $|W_i| = \max |W_i|$; 4) расчет рассогласования $\Delta(t)$ между расчетным и реальным значениями $y(t)$; 5) определение ошибки Δk_i , вызвавшей появление $\Delta(t)$; 6) изменение первичных параметров для минимизации $\Delta(t)$.

Очевидна аналогия технического алгоритма и организационных мероприятий.

Техническая реализация их на ЦВМ — обобщенный алгоритм управления организационно-техническими объектами. Его решение сводится к решению системы несовместных уравнений:

$$\sum_{i=1}^n W_{ij} \Delta k_{ij} = \Delta(t) |_{t=t_j}, \quad (2)$$

где t_j — точка контроля на плановом интервале; m — количество точек контроля, определяемое периодичностью контроля и отчетности элементов контролируемых объектов.

В отличие от используемого в работе [3] решения системы уравнений (2), основанного на использовании метода наименьших

квадратов, может быть рекомендован более простой путь: при рассогласовании планового и реального уровней функции (1) введение в состав организации нового элемента, компенсирующего это отклонение. Для подразделений организационного типа это равносильно введению исполнителя, производительность работы которого позволит в течение следующего планового интервала компенсировать возникшее отклонение планового и реального ходов работ. В техническом объекте при этом изменятся характеристики объекта в целом — величины первичных параметров k_i . Тогда искомое решение можно представить в виде

$$\Delta k_i = \frac{\gamma \Delta(t)}{W_{ij}} \Big|_{t=t_k} \quad (3)$$

где γ — коэффициент, учитывающий взаимное влияние параметров, рассчитываемый по системе (2), или определяемый путем подстановки в реальную модель (1) результата (3) по всем параметрам; t_k — момент контроля, для которого выполняется условие $t_j = t_k$; $|W_{ij}| = \max |W_i|$; W_{ij} — значение весовой функции W_i , которую находим по производительности работы элементов объекта.

При реализации моделей (1)–(3) алгоритм управления выглядит как итерационная многошаговая процедура. Число шагов изменяется от одного до пяти в зависимости от уровня $\Delta(t)$.

Таким образом, сочетание чисто организационных приемов и методов управления техническими системами позволяет разрабатывать алгоритмы обобщенного типа, применение которых целесообразно рекомендовать в сложных системах. Очевидно, что в каждом конкретном случае требуется привязка к реальным условиям функционирования организации на основании детального анализа программы работы каждого управляемого объекта.

Список литературы: 1. Ивахненко А. Г., Зайченко Ю. П., Димитров В. Д. Принятие решений на основе самоорганизации. М., «Сов. радио», 1976. 276 с. 2. Антер М. Кибернетика и развитие. М., «Мир», 1970. 219 с. 3. Кузьмин И. В., Алексеев О. П. Информационно-советующая система контроля процесса проведения проекта. — В кн.: Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Вып. 38. Харьков, 1972, с. 5–7.

УДК 621.34:621.3.007.6

А. Н. ГВОЗДИНСКИЙ, канд. техн. наук,

В. П. МОДНОВ

Харьковский институт радиоэлектроники

СИНТЕЗ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО ОРГАНИЗАЦИОННОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУР

При построении АСУ организационными системами выдвигается необходимость исследования организационной и функциональной структуры объекта управления. Реализуют эти процедуры обычно

изолированно друг от друга, что затрудняет разработку адекватных объекту моделей управления. Между тем управление конкретным процессом происходит в рамках организационной иерархии, предназначенной для принятия многоцелевых решений. Поэтому целесообразно обобщать организационную и функциональную структуры объекта и на основании этого представления строить модели управления ими.

Рассмотрим процедуру построения обобщенной организационно-функциональной структуры при решении комплекса задач технической подготовки производства (ТПП) в рамках производственного объединения.

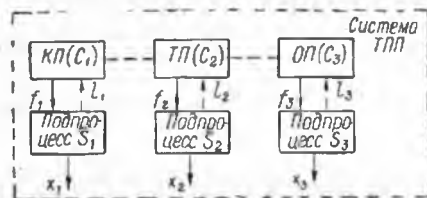


Рис. 1. Декомпозиция системы ТПП.

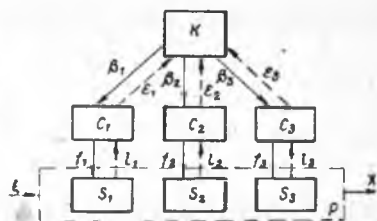


Рис. 2. Иерархическая структура системы ТПП.

Комплекс задач ТПП решается силами не одного предприятия, а ряда коллективов со сложной иерархической организационной структурой. Поэтому в АСУ такого класса наиболее приемлемым аппаратом исследования является теория управления сложными многоуровневыми системами.

На основании традиционных представлений систему ТПП можно представить состоящей из подсистем [2]: конструкторской (КП), технологической (ТП), организационной (ОП).

Осуществим декомпозицию подсистем на подпроцессы и подсистемы управления ими (рис. 1). Сигналы f_1, f_2, f_3 — управляющие сигналы; l_1, l_2, l_3 — сигналы обратной связи; x_1, x_2, x_3 — выходы подпроцессов.

Чтобы выработать взаимодействие подсистем $(S_1, C_1), (S_2, C_2), (S_3, C_3)$, введем некоторый орган верхнего уровня K , через который они взаимодействуют, для интеграции целей подсистем на основе выработки управляющих воздействий $\beta_1, \beta_2, \beta_3$. Достигается это с помощью сигналов обратной связи $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ (рис. 2).

Руководствуясь общими характеристиками описания иерархических систем, рассмотрим двухуровневую иерархическую структуру управления производственным объединением. Процесс производства управляется подсистемами нижнего уровня $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$, под которым подразумеваются органы управления предприятий, входящих в состав производственного объединения, с помощью управляющих воздействий $(m_1, m_2, \dots, m_N) \in M$. На

объект управления P влияют внешние возмущающие воздействия $\omega \in \Omega$ из внешней среды. Выход процесса P есть «продукт» производственного процесса $y \in Y$.

Процесс производства P можно представить в виде отображения $P: M \times \Omega \rightarrow Y$. Сигналы $z_1, z_2, \dots, z_N$; $z_i \in Z$ — обратная связь между процессом P и управляющими органами $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$. Выходом Π является локальное управление $m_i \in M$ (рис. 3).

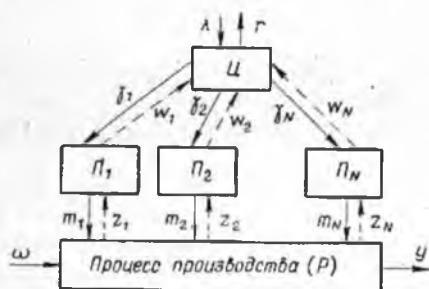


Рис. 3. Иерархическая структура управления производственным объединением.

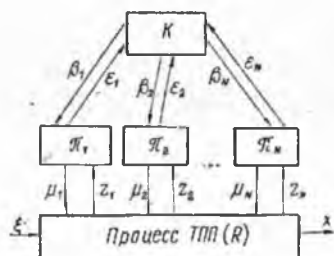


Рис. 4. Организационная иерархическая структура управления процессом ТПИ.

Вышестоящая управляющая система Π координирует нижестоящие системы координирующими сигналами $j_i \in \Gamma$, $j = (j_1, j_2, \dots, j_N) \in \Gamma$, $\Gamma = (\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_N)$ на основании получаемой информации $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N) \in W$.

Система Π получает координирующий сигнал λ от более высокого звена иерархической системы управления и выдает туда информацию о своем состоянии γ . Будем считать выделенное звено самостоятельным звеном в системе управления народным хозяйством в том смысле, что оно является объектом управления более высокого звена (промышленного объединения, министерства) наряду с другими производственными объединениями, подобно тому, как был рассмотрен процесс управления P . Поэтому сигналы λ, γ являются внешними для рассматриваемого звена и в дальнейшем в рамках выделенного звена не учитываются.

Таким образом, система Π_i производит отображение $\Pi_i: \Gamma \times \times z_i \rightarrow M$. Координатор (центр) производит отображение $\Pi: W \rightarrow \Gamma$. Сигналы обратной связи z_i , поступающие на вход локальной управляющей системы Π_i , содержат информацию о поведении процесса P , которая может быть представлена в виде отображения $\varphi_i: M \times \Omega \times Y \rightarrow z_i$. Аналогично информационный сигнал W , поступающий в вышестоящую систему Π , содержит в себе информацию о поведении нижестоящих управляемых систем: $\varphi_0: \Gamma \times \times Z \times M \rightarrow W$, $Z = z_1 \times z_2 \times \dots \times z_N$.

В описанной абстрактной модели управления производственным объединением, построенной с использованием работы [1], в явном виде не подразумевается коммуникация между нижестоящими

управляющими системами. Предполагается, что в необходимых случаях коммуникация осуществляется через Ц.

Используя представление системы управления ТПП в виде иерархической структуры (рис. 2), а также иерархическую структуру управления производственным объединением, можно получить иерархическую структуру управления функцией ТПП в рамках производственного объединения (рис. 3). Формально такое представление достигается следующим образом.

Представим иерархическую структуру системы управления процессом ТПП в виде множества $\varphi = \langle P, \xi, X, C_1, C_2, C_3, K, \Gamma, L, B, E \rangle$, организационную структуру управления — производственным объединением в виде множества $\psi = \langle P, \omega, y, \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N, \zeta, M, Z, \Gamma, W \rangle$. Выполнение отношений $p_i \in P, \xi \in \omega, x \in y$ очевидно. Подсистемы нижнего уровня $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$ можно выразить через множество функций управления: $\Pi_1 = \{C_1^1, C_2^1, \dots, C_n^1\}$; $\Pi_2 = \{C_1^2, C_2^2, C_3^2, \dots, C_n^2\}, \dots; \Pi_N = \{C_1^N, C_2^N, \dots, C_n^N\}$. Отсюда видно, что в функцию i -го элемента нижнего уровня входят функции конструкторской подготовки C_1 , технологической — C_2 , организационной подготовки производства C_3 , т. е. $\Pi_i \cap \{C_1, C_2, C_3\} = \{C_1^i, C_2^i, \dots, C_n^i\} \cap \{C_1, C_2, C_3\} = \{C_1^i, C_2^i, C_3^i\} = \pi_i$; $\{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N\} \cap \{C_1, C_2, C_3\} = \bigcup_{i=1}^N \pi_i = \{C_1, C_2, C_3\}$. Следовательно, $\pi_i \subset \{C_1, C_2, C_3\}$, так как $C_1 = \bigcup_i C_1^i, C_2 = \bigcup_i C_2^i, C_3 = \bigcup_i C_3^i$.

В функции координации подсистемы верхнего уровня Ц наряду с другими функциями координации содержится функция координации процессом ТПП: $\zeta = \{K^1, K^2, \dots, K^s, \dots, K^r\}$. Здесь $K^s = \{K_1^s, K_2^s, \dots\}$ — вектор s -й функции координации. Допустим, что вектор K^s является вектором координации, отождествляемым с функцией ТПП, тогда функция верхнего уровня системы управления процессом ТПП $K = \{K^s\}$. Отсюда вытекает, что $K \subset \zeta$ (по функциям координации).

Множество координирующих сигналов центра Ц соответствует множеству функций координации этого центра, т. е. $\Gamma = \{j^1, j^2, \dots, j^r\}$. Если j^s отождествляется с функцией координации процесса ТПП, то $j^s = \{j_1^s, j_2^s, \dots, j_N^s\} = B$ и, следовательно, $B \subset \Gamma$. Аналогично $E \subset W$.

Множество сигналов управления процессом производства P со стороны органов управления нижнего уровня $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$ соответствует функциям управления. Так, для i -го управляющего органа нижнего уровня Π множество сигналов управления $M_i = \{m_1^i, m_2^i, \dots, m_n^i\}$, где $i = \overline{1, N}$ $\{m_j^i\} \subset M_i$ — множество сигналов органа управления нижнего уровня π_i ; m_1^i — сигнал управления, соответствующий функции управления КП, m_2^i — сигнал,

соответствующий функции управления ТП; m_3 — сигнал управления, соответствующий функциям управления ОП.

Если обозначить все функции управления ТПП через множество $\{m_1, m_2, m_3\}$, то $M_i \cap \{m_1, m_2, m_3\} = \{m_1^i, m_2^i, \dots, m_n^i\} \cap \{m_1, m_2, m_3\} = \{m_1^i, m_2^i, m_3^i\} = \mu_i$; $\{M_1, M_2, \dots, M_N\} \cap \{m_1, m_2, m_3\} = \cup \mu_i = \{m_1, m_2, m_3\}$. Следовательно, $\mu_i \subset \{m_1, m_2, m_3\}$ так как $M_i = \cup m_1^i, M_2 = \cup m_2^i$.

Из рис. 2, 3 $m_1 = f_1, m_2 = f_2, m_3 = f_3$, поэтому $\mu_i = \{f_1, f_2, f_3\} = F$. В связи с тем что $\cup M_i = M, \cup \mu_i \subseteq \cup M_i$ или $F \subseteq M$.

Аналогично доказываются $\cup z_i = \{l_1, l_2, l_3\}$ и $L \subseteq Z$.

На основании изложенного можно сделать заключение, что пересечение структур $\varphi \cap \psi = \langle P, \xi, X, C_1, C_2, C_3, K, \Gamma, L, B, E \rangle \cap \langle P, \omega, y, \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N, \Omega, M, Z, \Gamma, W \rangle = \langle R, \xi, X, \cup \mu_i, K, \cup \mu_i, \cup z_i, B, E \rangle$ представляет собой некоторую структуру ρ , которая в сущности — результат действия некоторого оператора проектирования $H: \varphi \times \psi \rightarrow \rho$, или $\rho = H(\varphi, \psi)$.

Полученная таким образом иерархическая структура является организационной иерархической структурой управления процессом ТПП в рамках производственного объединения (рис. 4).

Список литературы: 1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М., «Мир», 1973. 640 с. 2. Митрофанов С. П. Научная организация серийного производства. М., «Машиностроение», 1970. 342 с. 3. Об утверждении общего положения о Всесоюзном и республиканском промышленных объединениях. Постановление ЦК КПСС и СМ СССР от 2 марта 1973 г. — «Правда», 1973, 3 марта.

УДК 007:519.76

А. Т. АШЕРОВ, канд. техн. наук

Украинский заочный политехнический институт

Т. В. КОШЕЛЬ

Харьковский институт радиоэлектроники

ОБ УТОЧНЕНИИ ПОНЯТИЯ «ЦЕННОСТЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ»

Одной из наиболее актуальных проблем исследования экономической информации становится проблема определения ее ценности. Цель настоящей работы — экспликация понятия «ценность экономической информации» путем «расщепления» его на элементарные составляющие.

Трудности в разрешении этой проблемы заключаются прежде всего в определении самого понятия «информация». Хотя окончательные выводы о понятии информации еще не сделаны и проблема информации существует, это не является непреодолимым

препятствием при решении проблемы ценности экономической информации. Понятия «информация», «экономическая информация», «ценность экономической информации» можно исследовать одновременно, не ожидая окончательных выводов о понятии «информация».

Рассматриваются две наиболее «влиятельные» концепции информации, так как выбор одной точки зрения означал бы неправомерную монополизацию одной из концепций.

Первая концепция информации может быть сформулирована следующим образом: «информация — свойство всей материи».

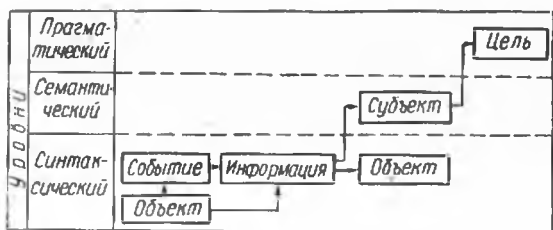


Рис. 1. Взаимодействие элементов на синтаксическом, семантическом и прагматическом уровнях.

Предполагается, что информация является свойством всех живых и неживых (физических и химических) объектов. Эта концепция нашла отражение в работах А. Н. Берга, В. М. Глушкова, Б. Н. Петрова, В. И. Сифорова, А. Д. Урсула.

Вторая концепция информации «информация — свойство части материи». Предполагается, что информация является свойством только самоуправляемых систем, составляющих биологическую и социальную формы движения. Развитию этой концепции посвящены работы П. В. Копнина, Б. С. Украинцева, В. С. Тюхтина, В. Г. Афанасьева. Обе концепции служат методологической основой для исследования понятия «ценность экономической информации». Само понятие «ценность информации» предполагает наличие объекта, события, информации о событии, субъекта и цели, которую ставит субъект (рис. 1).

Исходя из первой концепции информации применение понятия ценности информации как свойства информации оказывается некорректным, так как сама по себе информация в неживой природе, существующая независимо от человека и вообще от какой-либо самоуправляемой системы, не может обладать ценностью. Однако при взаимодействии с человеком информация проявляет это свойство. Признать появление нового свойства информации, а именно свойства ценности в процессе ее взаимодействия с субъектом, означало бы пренебречь положением К. Маркса о том, что «свойства данной вещи не возникают из ее отношения к другим вещам, а лишь обнаруживаются в таком отношении».

То, что информация не является вещью, не дает нам основания не принимать данное положение. В связи с этим возникает проблема: как объяснить появление свойства ценности информации в процессе ее взаимодействия с субъектом.

Решение этой проблемы дано в работе [2] и связано с системным подходом. Возникновение нового свойства — свойства ценности — является результатом объединения информации и субъекта, преследующего свою цель, в систему. Свойство целого является общим свойством для его частей. Это свойство не присуще каждому элементу в отдельности и не обнаруживается поэтому для самого элемента при взаимодействии его с другими. С этих позиций видна неконкретность выражения «ценность — свойство информации». Ценность не является ни свойством информации, которое ей присуще и обнаруживается в процессе взаимодействия с субъектом, ни свойством субъекта, который передает это свойство информации. Ценность — свойство отношения информации и субъекта или свойство системы, элементами которой являются информация и субъект, преследующий свою цель (рис. 2).

С точки зрения второй концепции выражение «ценность — свойство информации» — корректно. Вторая концепция исходит из возникновения информации на уровне жизни, и более правильным является определение информации не как свойства самоуправляемых систем, а как их отношения к объектам, т. е. информация рассматривается как само отношение субъекта к внешнему миру. Ценность в этом случае выступает в качестве свойства этого отношения (рис. 2).

Итак, информация может быть представлена и как свойство, и как отношение. Независимо от того, какой концепции придерживаться, ценность — свойство отношения. Содержание отношения зависит от выбранной концепции информации. Для первой концепции отношение — отношение информации и субъекта; для второй концепции отношением является сама информация. Базируя свои исследования на первой концепции информации, необходимо исходить из того, что ценность — свойство отношения. Принимая за основу вторую концепцию информации, необходимо исходить из того, что ценность — свойство информации.

Объектом нашего исследования является не информация вообще, а экономическая информация. Последняя относится к высшим видам информации, возникает на уровне жизни и обладает синтаксическими, семантическими и прагматическими свойствами. Экспликация понятия «информация» термином «экономическая» дает возможность, опираясь на первую и вторую концепции информации, определить ценность как свойство экономической информации (рис. 2).

Дальнейший этап исследования понятия ценности экономической информации предполагает разделение всех определений ценности экономической информации на прямые (описательные) и аксиоматические (формальные).

Определение 1 (прямое определение). Ценностью экономической информации для конкретного лица, принимающего решения (ЛПР), называется ее свойство, характеризующее степень пригодности информации и методов ее использования для решения задач, поставленных перед ЛПР, в системе, которая является подсистемой более сложной системы.

Определение 2 (аксиоматическое определение). Ценность экономической информации — синтетическое свойство, эксплицируемое посредством понятий элементарных свойств: $V_k = (\psi, \varphi, \nu, \rho, \pi, h, \zeta, \eta, \vartheta, \upsilon, \tau, \sigma, l, u, n, c)$.

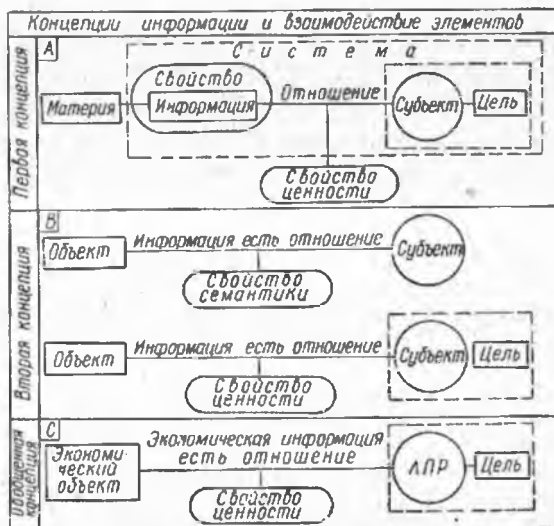


Рис. 2. Взаимодействие элементов, описываемых концепциями 1 и 2 и обобщенной концепцией.

Допущение 1. Множество элементарных свойств (е-свойств) экономической информации, составляющих синтетическое свойство V_k , включает следующие элементы: точность информации (ψ -свойство); безошибочность обработки информации (φ -свойство); непротиворечивость информации (ν -свойство); релевантность информации (ρ -свойство); пертинентность информации (π -свойство); полнота информации (h -свойство); краткость информации (ζ -свойство); наглядность информации (η -свойство); обозримость информации (ϑ -свойство); последовательность информации (υ -свойство); актуальность информации (τ -свойство); оперативность информации (σ -свойство); доступность информации (l -свойство); употребимость информации (u -свойство); новизна информации (n -свойство); стоимость информации (c -свойство).

Свойства однозначности σ , своевременности ϖ и активности υ информации, которые встречаются в работах, посвященных про-

блеме ценности информации, являются синонимами свойств соответственно непротиворечивости », оперативности о и употребимости и информации.

Следствие 1. «Богатство» понятия ценности экономической информации не исчерпывается приведенными выше свойствами. Увеличение числа элементарных свойств, включаемых в понятие ценности, делает более содержательными определения ценности экономической информации. Однако сфера применимости таких определений становится более ограниченной. Это заключение подчиняется закону обратного отношения между богатством содержания и объемом понятия (обобщения).

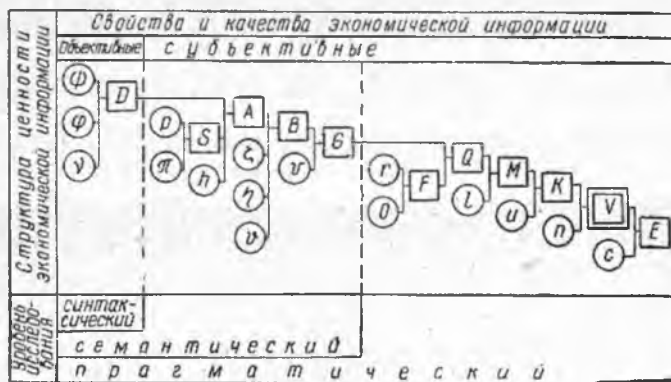


Рис. 3. Структура понятия «ценность экономической информации».

В данном изложении максимум содержания понятия «ценность экономической информации» имеет место при $i = 16$: $V_k = \bigwedge_{i=1}^{16} l_i = (\psi \wedge \varphi \wedge \gamma \wedge \delta \wedge \pi \wedge h \wedge \zeta \wedge \eta \wedge v \wedge \nu \wedge r \wedge o \wedge l \wedge u \wedge n \wedge c)$.

Допущение 2. Перечисленные элементарные свойства могут находиться в отношении подчиненности или независимости.

Допущение 3. Ценность экономической информации — ее субъективно-объективное свойство, т. е. ценность экономической информации имеет два полюса: полюс ценностных характеристик экономической информации, связанных с ценностью внутреннего содержания самой информации и противостоящих ЛПР (объективный момент), и полюс ценностных представлений, складывающихся в сознании ЛПР (субъективный момент).

Следствие 2. Исходя из допущения 3, можно выделить объективный и субъективный аспекты в изучении свойств экономической информации (рис. 3). Однако объективные свойства информации могут носить субъективный характер, и наоборот. Так, степень необходимой точности информации (объективное свойство) меняется в зависимости от функциональной области, где эта информация используется.

Допущение 4. Понятие «ценность экономической информации» включает в себя синтаксический и семантический уровни исследования (рис. 3).

Допущение 5. Совокупность элементарных свойств образует сложные свойства, которые для терминологического удобства назовем качествами ценности экономической информации (x -качествами):

достоверность информации (D -качество), $D = \psi \wedge \varphi \wedge \nu$;
содержательность информации (S -качество), $S = \rho \wedge \pi$;
адекватность информации (A -качество), $A = D \wedge S \wedge h$;
лаконичность информации (B -качество), $B = A \wedge \zeta \wedge \eta \wedge \theta$;
логичность информации (G -качество), $G = B \wedge \nu$;
свежесть информации (F -качество), $F = r \wedge o$;
качественность информации (Q -качество), $Q = G \wedge F$;
приспособленность информации (M -качество), $M = Q \wedge I$;
комплексность информации (K -качество), $K = M \wedge u$;
ценность информации (V -качество), $V = K \wedge n$;
эффективность информации (E -качество), $E = V \wedge c$.

В литературе синонимами качеств достоверности D , ценности V и эффективности E информации являются соответственно свойства объективности I , пригодности P и экономичности $\mathcal{E}$.

Допущение 6. При выше принятых допущениях понятие «ценность экономической информации» может быть интерпретировано многоуровневой структурой элементарных понятий e -свойств и сложных понятий x -качеств в соответствии с рис. 3.

На основе эксплицированного понятия «ценность экономической информации» появляется возможность решить ряд вопросов, связанных с разработкой банков данных (БД):

- 1) установить уровни ценности информации, хранящейся в БД;
- 2) спроектировать рациональные режимы обновления информации в БД с учетом ее старения;
- 3) организовать эффективный обмен информации между банками, данных высших и низших уровней.

Список литературы: 1. Маркс К. и Энгельс Ф. Соч. Изд. второе. Т. 23 М. Госполитиздат, 1960. 907 с. 2. Урсул А. Д. Проблема информации в современной науке. Философские очерки. М., «Наука», 1975. 288 с.

А. Т. АШЕРОВ, канд. техн. наук

Украинский заочный политехнический институт

Т. В. КОШЕЛЬ

Харьковский институт радиозлектроники

**ОБОБЩЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЦЕННОСТИ
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ОРИЕНТИРОВАННАЯ
НА МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ХРАНЕНИЯ**

Разработка моделей обновления информации в банках данных (БД) предполагает наличие некоторых моделей старения информации. Старение экономической информации определяется как изменение ценности информации во времени. Сама ценность информации зависит от многих факторов [1, 2]. Существует ряд концепций ценности информации, ориентированных на различные цели исследований. Цель настоящей работы — построение на базе существующих концепций ценности информации конструктивной обобщенной концепции, эксплицируемой в терминах свойств информации и цели пользователя. Разработка ведется с позиции применения этой концепции при исследовании процессов старения и обновления информации в банках данных.

Для построения обобщенной концепции ценности информации сформулируем некоторые принципиальные утверждения о свойствах информации и системы, цели пользователя и процедуре ее достижения.

1. Оценка ценности информации может быть произведена только в случае, если лицо, принимающее решение (ЛПР), находится в целеустремленном состоянии.

2. Оценка ценности информации должна быть двухступенчатой: на первой (целевой) ступени находим меру ценности информации, выраженную в терминах цели и процедуры ее достижения; на второй (структурной) ступени исследуется само понятие ценности в виде многоуровневой иерархической структуры понятий элементарных (e) и сложных (x) свойств информации [3].

3. Ценность информации можно измерить только в терминах решений.

4. Информация, полученная в результате решения задачи, или выбранное решение могут влиять на оценку ценности информации, на основании которой принималось решение, т. е. последующая информация влияет на оценку ценности предыдущей информации (эффект последствий).

5. Оценку ценности информации можно применять для ЛПР, обладающих любым типом адаптации: биологическим или техноэволюционным. Это утверждение основывается на том, что ЛПР оценивает информацию, необходимую для достижения целей, которые характеризуются применительно к текущим задачам

приспособления (биологический тип адаптации) либо к будущим задачам приспособления (техноэволюционный тип адаптации).

6. Желаемые результаты решения задач и достижение целей оцениваем в категориях выхода или состояния, что дает возможность связать понятие ценности информации с понятиями системы и управления.

7. В процессе управления входят выбор операций как видов целеустремленной деятельности и управление конкретной операцией с выбранной или поставленной извне целью. Операция — упорядоченная совокупность действий, связанных взаимными отношениями, или серия последовательно принимаемых решений, направленных на решение задач и достижение целей в системе, которая является подсистемой более сложной системы. Систему, осуществляющую операцию, представим в виде двух подсистем: управляющей (орган управления) с включенным в нее банком данных (БД) и управляемой (объект управления).

8. Управление есть такое использование причинно-следственных связей, при котором возникает поведение системы, приводящее к желаемому результату (система достигает цели или решает задачу).

9. Качество управления, если его оценивать в целом, есть производное от качества принимаемых решений.

10. Качество принимаемых решений есть производное от ценности информации.

12. Ценность информации и ее свойство — старение — определяют способы и методы хранения и обновления информации в банках данных.

13. Развитие и функционирование банков данных рассматриваем не как чисто аккумулятивный процесс, т. е. как бесконечное непрерывное накопление новой информации, а как процесс накопления и непрерывного обновления информации. Процесс обновления информации применим к ретроспективной информации, так как свойством старения обладает только ретроспективная информация.

14. Ценность информации и ее свойство старения можно выразить в терминах спроса на информацию. Последний представляет собой потребности на информацию, учитывающие затраты на ее получение. Удовлетворение потребностей в информации является внешним критерием функционирования БД.

Все определения ценности информации разделим на прямые (описательные) и аксиоматические (формальные).

Определение 1 (прямое определение). Ценностью информации называется ее свойство, характеризующее степень пригодности информации и методов ее использования для проведения операции.

Определение 2 (аксиоматическое определение). Ценность информации есть математическое понятие, определяемое следующими утверждениями и дефинициями.

15. Задана модель системы, которая осуществляет определенную операцию в виде

$$S = (I, \theta, u, x, y, R_1, R_2, R_3, R_4), \quad (1)$$

где I, θ, u — соответственно векторные функции входа (входной информации, которой необходимо дать оценку ценности), состояния и выхода управляющей системы S' (или ЛПР); u, x, y — соответственно векторные функции входа, состояния и выхода управляемой системы S'' ; R_1 — бинарное отношение, определяющее зависимость состояния управляющей системы от ее входа (входных воздействий): $IR_1\theta \Leftrightarrow (I, \theta) \in R_1, R_1 \subset I \times \theta$; R_2 — бинарное отношение между парой вход — состояние и выходом управляющей системы S' : $(I, \theta)R_2u \Leftrightarrow ((I, \theta), u) \in R_2, R_2 \subset (I \times \theta) \times u$; R_3 — бинарное отношение между тройкой вход — состояние — выход управляющей системы S' и состоянием управляемой системы S'' : $(I, \theta, u)R_3x \Leftrightarrow ((I, \theta, u), x) \in R_3, R_3 \subset (I \times \theta \times u) \times x$; R_4 — бинарное отношение между четверкой вход S' — состояние S' — выход S' — состояние S'' и выходом S'' : $(I, \theta, u, x)R_4y \Leftrightarrow ((I, \theta, u, x), y) \in R_4, R_4 \subset (I \times \theta \times u \times x) \times y$.

Бинарные отношения $R_1 - R_4$ не требуют однозначности реакции управляющей или управляемой системы, т. е. 1) возможны два (или более) состояния $\theta_1, \theta_2 \in \theta$ управляющей системы при некотором входном воздействии (или входной информации), таких, что $(I, \theta_1) \in R_1$ и $(I, \theta_2) \in R_1$; 2) возможны два (или более) выхода $u_1, u_2 \in U$ управляющей системы S' (равносильно два (или более) входа управляемой системы S'') при некотором входном воздействии I , таких, что $(I, \theta, u_1) \in R_2$ и $(I, \theta, u_2) \in R_2$; 3) возможны два (или более) состояний $x_1, x_2 \in X$ управляемой системы S'' при некотором входном воздействии I , таких, что $(I, \theta, u, x_1) \in R_3$ и $(I, \theta, u, x_2) \in R_3$; 4) возможны два (или более) выхода $y_1, y_2 \in Y$ управляемой системы при некотором входном воздействии I , таких, что $(I, \theta, u, x, y_1) \in R_4$ и $(I, \theta, u, x, y_2) \in R_4$.

В частном случае модель системы может быть представлена коротцем

$$S = (I, \theta, u, x, y, E, Q, F, G), \quad (2)$$

где отношения $E \subset I \times \theta, Q \subset (I \times \theta) \times u, F \subset (I \times \theta \times u) \times x, G \subset (I \times \theta \times u \times x) \times y$ — функциональные, т. е. $\theta = E(I), u = Q(I, \theta), x = F(I, \theta, u), y = G(I, \theta, u, x)$.

Функциональные отношения E, Q, F, G требуют однозначности реакции системы. Они представляют собой функции, преобразующие входные процессы в выходные.

Модель (2) ориентирована на исследование ценности информации в технических системах, модель (1) — в организационных. Введение сферы приложений моделей объясняется тем, что функциональные отношения E, Q, F, G требуют однозначности реакции системы на входные воздействия; отношения $R_1 - R_4$ допускают многозначность.

16. На основании пп. 6 и 15 цель операции — достижение некоторого конечного состояния $x^1 = x(t_1)$ или конечного значения выхода $y^1 = y(t_1)$.

17. Цель T операции включает экзогенную T_k и эндогенную T_n цели: $T_k = \{T_k^m\} = \{a_i, \tau, c_i\} \in F_k^0, m \in M_k, T_n = \{T_n^m\} \in F_n^0, m \in M_n$, где T_k^m — показатели эффективности решения задач управления и достижения целей, поставленных суперсистемой; a_i, τ, c_i — соответственно технические, временные и стоимостные характеристики цели; T_n^m — показатели эффективности проведения операции (себестоимость, прибыль, производительность); F_k^0, F_n^0 — области допустимых значений; M_k, M_n — множества показателей.

18. Предполагаем, что существует критерий Φ выбора стратегии, обеспечивающей оптимальное в каком-либо смысле протекание операции. Этот критерий, по существу, является критерием эффективности операции, в котором отражаются экзогенные и эндогенные цели. Критерий можно представить в виде $W = \text{extr } \Phi(T_k, T_n)$.

На основании п. 1—18 дадим первое аксиоматическое определение ценности информации: $V = \Delta W = \text{extr } \Phi - \text{extr } \Phi_0$, где $\text{extr } \Phi_0, \text{extr } \Phi$ — соответственно значения целевого функционала до и после получения информации, на основании которой принимали решение для осуществления операции.

19. На основании п. 1 с учетом приведенных выше утверждений дадим второе аксиоматическое определение ценности информации: ценность информации есть сложное свойство, которое интерпретируется через иерархическое множество элементарных свойств; между последними существуют отношения P_1 однородности, P_2 вхождения в качество x , P_3 подчиненности и P_4 независимости; эти отношения обладают фиксированными свойствами, т. е. $V = \{V_e, P_1, P_2, P_3, P_4\}$.

20. Из существования отношения однородности следует, что в структуре понятия «ценность информации» могут существовать группы, каждая из которых содержит по несколько однородных свойств: $e_i P_1 e_j P_1 e_k$ и $e_i \in x_i, e_j \in x_i, e_k \in x_i$.

Следствие. Образование группы фиксируется качеством.

21. Из существования вхождения в качество следует следующее:

а) ценность информации можно эксплицировать качествами, которые представляют собой сложные свойства $V = \{x_i\}$;

б) качество x_i содержится в качестве $x_i x_i \subset x_j$, если всякое свойство качества x_i является одновременно свойством качества x_j ;

в) качества не могут частично перекрываться, они не содержат общих свойств либо одно качество содержит другое, т. е. если $e_i \in x_k, e_i \in x_i$, то $x_k \subset x_i$ либо $x_i \subset x_k$, либо $x_i = x_k$;

Слоиста в качества экономической информации													Процедуры управления			
													учет	анализ	принятие решений	
х-качества													Операции над информацией			
													прсобра- зование, кодирова- ние, вы- числения	анализ данных, класси- фикация ситуации, поиск	прогноз, выбор стратегий, определе- ние критериев	
E	V	K	M	Q	F	G	B	A	S	D	ε-свойства					
эффективность													ценность			
													комплексность			
													принадлежность			
													качественность			
													логичность			
													лаконичность			
													адекватность			
													содержа- тельность			
													достовер- ность			
													свежесть			
													точность			
													безошибочность			
													непротиворечивость			
													pertинентность			
													релевантность			
													плотность			
													полнота			
													краткость			
													наглядность			
													обозримость			
													последовательность			
													актуальность			
													оперативность			
													доступность			
													употребимость			
													новизна			
													стоимость			

Рис. 1. Требования к качеству информации по процедурам управления.

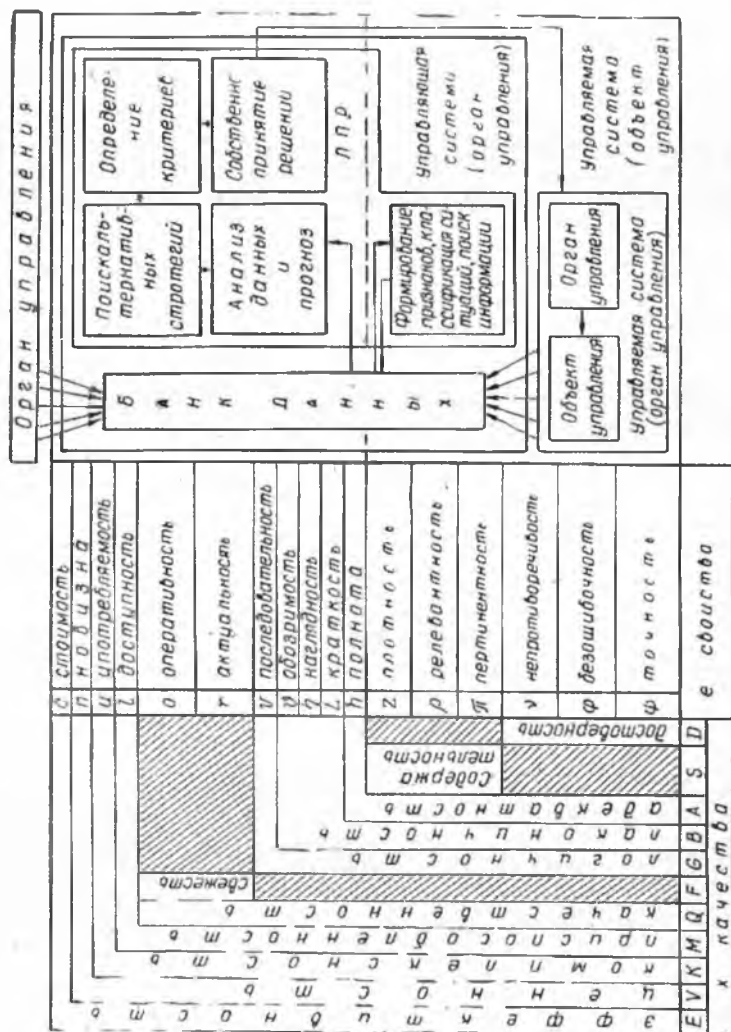


Рис. 2. Соотношение элементов целевого и структурного описания понятия «ценность экономической информации».

г) существует единственное качество, которое не входит ни в одно качество.

Следствие. Эффективность информации есть максимальное качество. Если рассматривать ценность информации как характеристику информации в преобразованном виде, ценность информации есть максимальное качество.

Содержание п. 19—21 соответствует структурному аспекту описания ценности информации (рис. 1).

На основании утверждений определение понятия ценности информации является двойственным:

$$V_{\text{def}} = \Delta(\text{extr } \Phi) \text{ или } V_{\text{def}} = \{V_e, P_1, P_2, P_3, P_4\}.$$

Каждое из этих определений дополняет смежное, поэтому считаем, что

$$V_{\text{def}} = \Delta(\text{extr } \Phi) \wedge V_{\text{def}} = \{V_e, P_1, P_2, P_3, P_4\}.$$

Ценность информации есть синтетическое понятие, эксплицируемое понятиями двух уровней. На верхнем, целевом, уровне ценность информации — мера приращения критериальной функции или целевого функционала. На нижнем, структурном, уровне ценность информации интерпретируется иерархическим множеством элементарных свойств, между которыми существуют определенные отношения ($P_1 — P_4$) с фиксированными свойствами (рис. 2).

Итак, принятое определение ценности информации носит экстенсивно-интенсивный характер. Экстенсивность отражена в структуре отношений элементарных свойств, интенсивность заключается в определении ценности информации как свойства, зависящего от времени. Определение ценности информации построено на основании редукции всего многообразия концепций ценности информации к двум основным направлениям и интерпретации последних с единых позиций взаимосвязи свойств информации, цели пользователя и процедур ее достижения. Введенные определения являются рабочими, ориентированы на дефиницию понятий, связанных с исследованиями эффективности функционирования банков данных и поэтому не претендуют на завершенность.

Список литературы: 1. Ясин Е. Г. Об эффективности АСОД и проблеме измерения ценности данных. — «Экономика и математические методы», 1971, т. VII, вып. 3, с. 389—396. 2. Жеребин В. М. Язык экономических систем и оценка информации. — «Экономика и математические методы», 1968, т. IV, вып. 5, с. 751—762. 3. Ашеров А. Т., Кошель Т. В. Об уточнении понятия «ценность экономической информации». — См. статью настоящего сборника.

УДК 62—5:032

В. А. ГУЛИУС

Харьковский институт радиоэлектроники

ПРИВЕДЕНИЕ ЗАПИСЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕСКРИПТОРА

При решении большинства задач АСУ возникает необходимость обработки информационных массивов (файлов), имеющих записи переменной длины (запись состоит из двух частей:

постоянной и переменной). Количество реквизитов переменной части обычно изменяется от одной записи к другой. Это, например, технологические карты обработки детали, спецификации, перечни технологического оборудования производственных участков.

Организация рациональной структуры файлов и правильность их размещения на магнитных носителях заметно сказывается на эффективности использования вычислительных средств.

Несмотря на то что трансляторы проблемно-ориентированных языков большинства современных ЭЦВМ позволяют обрабатывать файлы с записями переменной длины, обработка таких массивов имеет ряд существенных недостатков. В связи с этим весьма актуальна проблема преобразования записей переменной длины к фиксированной. Как и в работе [1], под исходными файлами подразумеваем файлы записей переменной длины, а файлы, сформированные из первых путем получения записей постоянной длины, — приведенными.

Постановка задачи. Пусть задано множество w записей переменной длины $W_1, W_2, \dots, W_w$, которое для краткости обозначим $\{W\}$. Это множество образует исходный файл. Каждая запись множества $\{W\}$ может быть описана с помощью четырех величин, образующих так называемый вектор параметров записи $\langle c, \delta, k, \lambda \rangle$. Все параметры записи являются неотрицательными числами и означают следующее: c — длина постоянной части записи (в количестве символов); δ — длина реквизита переменной части (в символах); k — среднее число реквизитов переменной части по всем записям массива; λ — максимальное число реквизитов переменной части по всем записям массива.

Необходимо преобразовать исходное множество $\{W\}$ таким образом, чтобы все записи приведенного множества (или множества) содержали одинаковое количество символов.

Описание метода приведения. Сущность метода преобразования заключается в следующем. В каждой записи исходного файла выделяем постоянную часть записи, присваиваем ей дескриптор, после чего эту часть заносим на магнитную ленту, предназначенную для хранения постоянных частей всех записей исходного файла. Этот же дескриптор присваиваем каждому реквизиту переменной части записи. Затем реквизиты заносим на магнитную ленту.

В результате такого преобразования исходное множество $\{W\}$ разбиваем на два подмножества: $\{W^1\}$ — подмножество записей, содержащих постоянные части всех записей исходного файла, $\{W^2\}$ — подмножество записей, образованных из реквизитов переменных частей исходного файла. Каждый реквизит переменной части исходного множества совместно с дескриптором образует индивидуальную запись. Таким образом, подмножество $\{W^1\}$ содержит w записей, $\{W^2\}$ — kw записей. Между элементами подмножеств $\{W^1\}$, $\{W^2\}$ выполняется отношение эквивалентности, т. е. удовлетворяется условие рефлексивности, симметричности

и транзитивности. Подмножества записей $\{W^1\}$, $\{W^2\}$ образуют приведенные файлы, которые размещаются на отдельных магнитных лентах, что, как показано в работе [2], значительно повышает быстродействие обработки записей. Схематический пример приведения записей с помощью дескриптора показан на рисунке.

Для оценки эффективности метода приведения записей с помощью дескриптора необходимо получить аналитическое выражение для величины удельной избыточной информации. Этот параметр представляет собой отношение объема избыточной информации, образованного в результате приведения, к количеству записей исходного массива.

Длина исходного файла

$$H = (c + k\delta)w. \quad (1)$$

Обозначим количество символов, образующих дескриптор, через n . Тогда длина файла 1, состоящего из постоянных частей записей исходного файла (с учетом дескриптора),

$$H_1 = (c + n)w. \quad (2)$$

Длина файла 2, составленного из реквизитов переменных частей всех записей,

$$H_2 = (\delta + n)kw. \quad (3)$$

Суммарная длина двух файлов, образованных после приведения исходного,

$$H' = H_1 + H_2 = (c + n)w + (\delta + n)kw. \quad (4)$$

Таким образом, увеличение приведенного массива в результате введения символов, образующих дескриптор,

$$\Delta H = H' - H = wn(1 + k), \quad (5)$$

величина удельной избыточной информации

$$\Delta H/w = n(1 + k). \quad (6)$$

Выбор способа приведения. Кроме описанного метода приведения записей при помощи дескриптора, известны три способа преобразования файлов к фиксированной длине [1].

Первый способ — максимизация переменной части записи — заключается в превращении списка реквизитов переменной части записи в запись постоянной длины. Фиксированная длина полученных записей равна длине постоянной части, а также длине максимально допустимого списка реквизитов переменной части.

Второй способ заключается в повторении постоянной части записи при каждом реквизите переменной части. При таком способе преобразования постоянная часть записи повторяется столько раз, сколько реквизитов содержит переменная часть исходного массива.

Исходный файл

Запись $i - 1$	Постоянная часть
	1 реквизит
	2 реквизит
	3 реквизит
	4 реквизит
Запись i	Постоянная часть
	1 реквизит
	2 реквизит
Запись $i + 1$	Постоянная часть
	1 реквизит
	2 реквизит
	3 реквизит

Приведенные файлы

Файл 1

дескриптор $i - 1$	постоянная часть
дескриптор i	постоянная часть
дескриптор $i + 1$	постоянная часть

Файл 2

дескриптор $i - 1$	1 реквизит
дескриптор $i - 1$	2 реквизит
дескриптор $i - 1$	3 реквизит
дескриптор $i - 1$	4 реквизит
дескриптор i	1 реквизит
дескриптор i	2 реквизит
дескриптор $i + 1$	1 реквизи
дескриптор $i + 1$	2 реквизи
дескриптор $i + 1$	3 реквизи

Схема приведения записей с использованием дескриптора.

Третий способ преобразования к фиксированной длине состоит в выравнивании длин постоянной и переменной частей записи. При таком преобразовании менее длинный реквизит дополняется некоторыми символами (пробелы, звездочки) в количестве, соответствующем разности длин этих реквизитов. После выравнивания постоянная часть записи и каждый реквизит переменной части исходного массива считают отдельными записями.

В табл. 1 приведены способы приведения файлов переменной длины; для каждого способа дается формула для величины удельной избыточной информации. Основным критерием выбора способа приведения в каждом случае является минимальное значение удельной избыточной информации:

$$A = \min_N (\Delta H/w). \quad (7)$$

где N — способ приведения. В табл. 2 в качестве примера приведены параметры четырех векторов и величина удельной избыточной информации для описанных методов приведения.

Таблица 1

Способ приведения файла	$\Delta H/w$
Максимизация переменной части	$\delta (\lambda - k)$
Повторение постоянной части	$c (k - 1)$
Выравнивание длин	$\delta - c$ при $c < \delta$ $k + 1$ при $c = \delta$ $k (c - \delta)$ при $c > \delta$
С помощью дескриптора	$n (1 + k)$

Считаем, что количество записей исходного файла не превышает 10^5 , что позволяет ограничить значение $n = 4$.

Таблица 2

Параметры записи				$\Delta H/w$			
				Метод приведения			
c	δ	k	λ	1	2	3	4
20	130	5	15	1300	80	110	24
25	65	4	16	455	200	40	40
25	5	4	10	30	75	80	20
30	30	8	15	210	210	9	36

На основании данных табл. 2 можно сделать вывод, что для описанных векторов параметров предпочтителен предлагаемый способ преобразования файлов. Исключением является лишь случай, когда $c = \delta$. При этом величина удельной избыточной информации принимает минимальное значение для третьего способа приведения. Применение этого способа имеет весьма существенный недостаток: в программе необходимо предусматривать специальные процедуры для распознавания постоянной и переменной части записи, что приводит к дополнительным затратам времени на обработку файла. Следовательно, использование способа приведения с помощью дескриптора для этого случая также более эффективно.

Предлагаемый метод приведения записей переменной длины с помощью дескриптора апробирован при создании информационной базы подсистемы оперативно-производственного планирования предприятия. Он оказался более эффективным по сравнению с другими методами.

Список литературы: 1. Первин Ю. А., Португал В. М., Семенов А. И. Планирование мелкосерийного производства в АСУП. М., «Наука», 1973. 455 с.
2. Кожурин Ф. Д., Ярмош Н. А. Структурная обработка больших информационных массивов. Минск, «Наука и техника», 1973. 200 с.

УДК 621.391

Ю. П. ПЯТКОВ, канд. техн. наук,
А. П. АКИМОВ, канд. техн. наук,
В. М. СИЗОВ

Харьковский институт радиоэлектроники

ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Операторы АСУ решают стоящие перед ними задачи путем анализа информационной модели. Под информационной моделью следует понимать представляемую при помощи устройств отображения информацию о состоянии и функционировании объектов управления и внешней среды [1]. Эффективность решения задач управления в АСУ во многом зависит от объема информации, включенной в информационную модель, от способов ее организации и особенностей представления. Построение информационной модели должно вестись с учетом ряда факторов, к основным из которых можно отнести: класс решаемых оператором задач, структурную сложность отдельных задач одного и того же класса, плотность потока информации, требующей обработки, корреляционной связи, значимость и статистические характеристики отдельных задач, соотношение полезной и иррелевантной информации.

При проектировании АСУ необходимо стремиться к созданию оптимальной информационной модели путем всестороннего учета влияющих на нее факторов. Комплексный учет перечисленных факторов затруднен. Это объясняется тем, что при оптимизации информационной модели нельзя использовать единый математический аппарат для описания количественных и качественных факторов, которые влияют на эффективность информационной модели. В реальных информационных моделях наряду с полезной, необходимой для решения выбранной задачи, информацией всегда присутствует иррелевантная для этой задачи информация. Наличие иррелевантной информации в любом случае увеличивает время решения задачи. Наибольшее влияние на время

оказывает информация, не относящаяся к признакам данной задачи из группы взаимосвязанных задач [2].

На пункте управления не все операторы имеют персональные устройства отображения (УО), а следовательно, они выполняют свои обязанности с обязательным привлечением коллективных устройств (средств) отображения. Причем для одних операторов они являются единственным источником получения информации, для других — дополнительным источником осведомительной информации. Таким образом, можно выделить две группы операторов по использованию устройств отображения. Для первой группы характерно решение возложенных на них задач только с использованием информации персональных УО, для второй — использование информации как персональных, так и коллективных УО.

Показатель эффективности информационной модели должен учитывать ее основное назначение — качественное решение задач операторами. Одно из условий обеспечения качественного решения задач управления — соответствие объема отображаемой информации психофизиологическим возможностям оператора по приему, переработке информации и принятию решения. Поэтому показатель эффективности должен учитывать наиболее существенные признаки, зависящие от объема отображаемой информации, а также наличие различных устройств отображения на пункте управления.

Показатель эффективности информационной модели определим при условии, что на пункте управления должны быть решены M задач управления, а каждым оператором решается ξ задач ($\xi = \overline{1, m}$), причем $m < M$. Каждая ξ -я задача управления может быть охарактеризована вероятностью ее выполнения P_{ξ} , важностью C_{ξ} , сложностью E_{ξ} .

Показатель эффективности информационной модели должен характеризовать качество решения группы задач, а каждая задача может быть оценена вероятностью правильного решения ее $P_{r\xi}$, средним временем ее решения $\bar{t}_{r\xi}$, количеством допущенных ошибок $\Delta\gamma_{\xi}$, поэтому показатель эффективности целесообразно представить в виде нескольких частных показателей.

Ввиду различной размерности частных показателей даже весовое суммирование их не приводит к правильному результату. Поэтому задачу оптимизации информационной модели можно считать многокритериальной или векторной.

Показатель эффективности информационной модели выбираем исходя из условий минимизации потерь, которые будут иметь место для j -го оператора ($j = \overline{1, n}$) при выбранном варианте распределения информации между УО. За частные показатели эффективности информационных моделей для основных широко распространенных случаев (установка оператора на «скорость» и «точность») целесообразно принять средние потери во времени

решения задачи оператором за счет неоптимального объема информации на УО ($\Delta\bar{T}$) и среднее значение допущенных ошибок ($\Delta\bar{\Gamma}$) при решении задачи для выбранного варианта распределения информации по сравнению с идеальным. Средние потери решения задач во времени

$$\Delta\bar{T} = \frac{1}{m} \sum_{\xi=1}^m P_{\rho_{\xi}} (t_{\rho_{\xi}} - t_{\rho_{\xi}}^0), \quad \xi = \overline{1, m}.$$

где $t_{\rho_{\xi}}$ — время решения ξ -й задачи для выбранного варианта распределения информации между устройствами отображения; $t_{\rho_{\xi}}^0$ — время решения ξ -й задачи при идеальном распределении информации между устройствами отображения; m — число задач, решаемых j -м оператором.

Вероятности решения ξ -й задачи операторами, имеющими персональные УО и не имеющие их, вычисляем по-разному. Вероятность решения ξ -й задачи $P_{\rho_{\xi}}$ оператором персонального УО при использовании коллективного УО и при условии равновероятного обращения к последним

$$P_{\rho_{\xi}} = \mu P(V_{\xi}) P(V_{\xi}/W_1) \dots P(V_{\xi}/W_1 W_2 \dots W_{\mu}),$$

где $P(V_{\xi})$ — вероятность решения ξ -й задачи только по персональному УО с объемом информации V_{ξ} ; $P(V_{\xi}/W_1 W_{\mu})$ — вероятность решения ξ -й задачи по персональному УО с объемом информации V_{ξ} при условии использования информации коллективных УО с объемом $W_1, W_2, \dots, W_{\mu}$; μ — число коллективных УО.

Вероятность решения ξ -й задачи оператором, не имеющим персонального УО, при условии равновероятного обращения к коллективным УО

$$P_{\rho_{\xi}}^* = \mu P(W_1) P(W_1/W_2) \dots P(W_1/W_2 W_3 \dots W_{\mu}),$$

где $P(W_1)$ — вероятность решения ξ -й задачи только с использованием коллективного УО с объемом информации W_1 ; $P(W_1/W_2) \dots W_{\mu}$ — условная вероятность решения ξ -й задачи по коллективному УО с объемом информации W_1 при условии, что используются коллективные УО с объемами информации $W_2, W_3, \dots, W_{\mu}$.

Среднее число допущенных ошибок при решении одной задачи

$$\Delta\bar{\Gamma} = \frac{1}{m} \sum_{\xi=1}^m \Delta\gamma_{\xi}.$$

Тогда обобщенный показатель эффективности информационной модели, состоящий из двух частных показателей,

$$K(\Delta\bar{T}, \Delta\bar{\Gamma}) = K \left[\frac{1}{m} \sum_{\xi=1}^m P_{\rho_{\xi}} (t_{\rho_{\xi}} - t_{\rho_{\xi}}^0), \frac{1}{m} \sum_{\xi=1}^m \Delta\gamma_{\xi} \right].$$

Оптимизация выбранного показателя эффективности для персональных и коллективных УО сводится к минимизации

$$K(\Delta\bar{T}^*, \Delta\bar{I}^*) = \min_{\Delta\bar{T}, \Delta\bar{I}} K(\Delta\bar{T}, \Delta\bar{I}).$$

Задачу оптимизации показателя эффективности информационной модели можно решить методом последовательных уступок [3], который состоит в следующем: частные* показатели располагаются в порядке их относительной важности; минимизируют первый, наиболее важный показатель, затем назначают величину допустимого увеличения значения этого показателя при условии, что значение первого показателя не должно отличаться от минимального более, чем на величину установленной уступки. Выбранный показатель эффективности информационной модели может быть применен для оптимизации объема отображаемой информации; для сравнения информационных моделей по точностным и временным характеристикам операторов.

Список литературы: 1. Введение в эргономику. Под ред. В. П. Зинченко, М., «Сов. радио», 1974. 352 с. 2. Галактионов А. И. Представление информации оператору. М., «Энергия», 1969. 98 с. 3. Подиловский В. В., Гаврилов В. М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М., «Сов. радио», 1975. 192 с.

УДК 62—50

В. П. АВРАМЕНКО, канд. техн. наук
Харьковский институт радиоэлектроники

МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Задачи идентификации. Для повышения эффективности функционирования сложных технологических комплексов в условиях неопределенности (слабая изученность процессов, интенсивное действие помех) все чаще создаются адаптивные автоматические системы, управляющее устройство которых обеспечивает возможность текущего определения характеристик и состояний процесса (задача идентификации), а также принятия решения по управлению на основании выбранного критерия оптимальности с учетом фактических значений параметров и текущих состояний процесса (задача оптимизации).

Основная задача идентификации состоит в построении математической модели, которая адекватно отражает наиболее существенные закономерности процессов, протекающих в объекте. В задачах управления основная цель идентификации — выбор структуры и оценка параметров модели, которые необходимы для выработки оптимальной стратегии управления. Текущее определение характеристик и состояний процесса в режиме нормальной эксплуатации производится в блоке идентификатора.

методов исследования. Аналитические методы дают априорную информацию о структуре и ориентировочных параметрах модели, что позволяет получить более достоверные оценки при малых выборках. Численные значения коэффициентов, полученные из уравнений материального и энергетического баланса, могут быть определены достаточно точно в исключительных случаях для объектов с весьма простой структурой. Экспериментальные методы исследования уточняют коэффициенты уравнений и проверяют адекватность модели реальному объекту. В системах оперативного контроля и управления применяются адаптивные модели идентификации, которые способны с течением времени изменять структуру и параметры так, чтобы по своим свойствам приблизиться к изучаемым системам. Применение рекуррентной процедуры оценивания дает возможность оперативно корректировать параметры модели по мере получения дополнительных исходных данных.

Если априорная информация об управляемом процессе отсутствует или весьма невелика, применяются функционально-параметрическую идентификацию, включающую в себя следующие задачи: выбор структуры модели; планирование эксперимента; выбор метода обработки результатов измерений; выбор информативных переменных; оценивание линейности, стационарности, детерминированности процесса; выбор алгоритма настройки параметров модели; исследование скорости сходимости алгоритмов оценивания; изучение вопросов повышения помехоустойчивости алгоритмов; проверка алгоритмов идентификации в промышленных условиях. Необходимость решения задач функционально-параметрической идентификации возникла в последнее десятилетие, поэтому результаты здесь значительно скромнее, что объясняется в первую очередь сложностью поставленной проблемы. Приведенные в работе результаты исследования посвящены выбору методов параметрической идентификации технологических процессов в условиях нормальной эксплуатации объекта по результатам пассивного эксперимента.

Методы идентификации. Накоплен достаточно большой арсенал методов параметрической идентификации, из которых в первую очередь следует отметить метод наименьших квадратов и метод максимального правдоподобия при оценивании статических характеристик, а также методы калмановской фильтрации и решение уравнения Винера — Хопфа при построении динамических характеристик. Задача идентификации в этом случае сводится к нахождению оператора A (коэффициенты уравнений ядра ряда Вольтерра) или начального состояния x_0 системы в момент времени $t = t_0$. Если t_0 лежит внутри интервала наблюдения, то имеет место задача сглаживания, наиболее характерная для систем оперативного контроля. Если t_0 находится на одном из концов этого интервала, рассматриваем задачу фильтрации, типичную для стохастических систем и систем обработки резуль-

татов измерений. Если t_0 лежит за пределами интервала наблюдения в будущем, имеем дело с задачей прогнозирования параметров и состояний исследуемого объекта. Эта задача решается всякий раз при выборе оптимального управляющего воздействия в системе.

Математическое описание сложного технологического комплекса включает в себя весьма большое число переменных. Если из дерева моделей выбрать конкретную модель, состояние и параметры последней определяются значительно меньшим количеством переменных. Тем не менее точное определение характеристик системы по ограниченному числу наблюдений практически невозможно, поэтому приходится довольствоваться их приближенными значениями — оценками. Пусть технологический процесс описывается конечным числом переменных $a_1, a_2, \dots, a_m$. Результаты наблюдений могут быть представлены прямыми или косвенными измерениями. В первом случае доступны измерения сами величины $a_i, i = \overline{1, m}$, однако в большинстве случаев измеряются некоторые функции $f_j(a_1, a_2, \dots, a_m), j = \overline{1, n}$ от совокупности неизвестных переменных $a_1, a_2, \dots, a_m$. Связь между результатами измерений $x_1, x_2, \dots, x_n$ и неизвестными переменными может быть представлена фундаментальной системой уравнений

$$f_j(a_1, a_2, \dots, a_m) + \delta_j = x_j, j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где δ_j — шум j -го измерения, имеющий две составляющих: ошибку модели и ошибку измерений.

В качестве математической модели технологического процесса чаще всего используются заранее выбранные функции, которые приемлемы с точки зрения описания физики процесса и вычислительных процедур. Предпочтительными в этом отношении являются линейные функции от неизвестных параметров, например линейное уравнение регрессии. Если принятая структура математической модели не полностью адекватна истинной функциональной зависимости между переменными технологического процесса, имеют место ошибки модели, которые не зависят от характера измерительной аппаратуры. Уточнить структуру модели можно, воспользовавшись методами корреляционного многофакторного анализа.

Особенность статистического оценивания параметров состоит в определении из фундаментальной системы (1), содержащей n уравнений, $m + n$ неизвестных: m переменных $a_1, a_2, \dots, a_m$ и n шумов измерений $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$. При решении таких недоопределенных систем можно использовать аппарат математического программирования или некоторые искусственные приемы, позволяющие устранить недоопределенность. Предположим, что шумы измерений $\delta_j, j = \overline{1, n}$ представляют собой случайные величины с заданными вероятностными характеристиками (точные значения шумов измерений остаются неизвестными). Если можно на

какое-то время пренебречь шумами измерений, положив $\delta_j = 0$, $j = \overline{1, n}$, фундаментальная система (1) заменяется системой условных уравнений

$$f_j(a_1, a_2, \dots, a_m) = x_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

являющейся избыточной системой, поскольку из n уравнений требуется определить m неизвестных при $n > m$. Оставляя m уравнений системы (2) и решая их относительно m неизвестных, получаем некоторые приближенные значения $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m$, представляющие собой оценки по минимуму данных, которые, как правило, не удовлетворяют системе условных уравнений. Если эти оценки подставить в левую часть уравнений (2), получим зависимость вида

$$x_j = f_j(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) + \Delta_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где Δ_j — невязка j -го измерения.

Задачу параметрической идентификации сводим к выбору алгоритма

$$\hat{a}_i = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

позволяющего вычислить оценки $\hat{a}_i$, $i = \overline{1, m}$ по результатам наблюдений x_j , $j = \overline{1, n}$. Структура алгоритма (4) существенно зависит от вида системы условных уравнений (2) и априорной информации о шумах измерений. При статистической обработке результатов наблюдений стараемся выбрать такие методы и алгоритмы оценивания (4), для которых совокупность невязок (3) обладала бы некоторыми экстремальными желаемыми свойствами. Задача выбора алгоритма по минимуму невязок в общем случае неоднозначна, поэтому возникает вопрос о выборе оптимального алгоритма оценивания.

Задача статистической обработки результатов наблюдений с использованием алгоритма (4) состоит в том, чтобы уменьшить влияние ошибок измерений и получить более достоверные значения оценок. Поскольку измерения являются случайными величинами, то и оценка как некоторая функция от случайных величин также является случайной величиной, обладающей такими характеристиками, как плотность вероятности, математическое ожидание, дисперсия. Приступая к параметрической идентификации, стараемся выбрать оценки, обладающие такими желаемыми свойствами, как состоятельность, несмещенность и эффективность. Оценка $\hat{a}_i$ является состоятельной, если при неограниченном увеличении объема выборки (числа наблюдений) она стремится по вероятности к значению параметра a_i . Если при этом она не дает систематической ошибки, т. е. если выполняется условие $E\{\hat{a}_i\} = a_i$ такая оценка является несмещенной. Несмещенная оценка эффективна в том случае, если она имеет

наименьшую дисперсию по сравнению с другими несмещенными оценками параметра.

В зависимости от количества априорной информации, используемой в вычислительной процедуре алгоритма (4) методы оценивания можно разделить на две группы. К первой — относят методы, не требующие каких бы то ни было сведений о характере распределения случайных величин, за исключением, быть может, предположения о нормальности распределения разброса данных. Таковыми, в частности, могут быть методы моментов, наименьших квадратов, наименьших модулей, метод минимакса. При использовании второй группы методов оперируют функциями распределения наблюдаемых величин, характер которых предполагается известным, а неизвестными являются некоторые числовые параметры. К этой группе принадлежит метод максимального правдоподобия, метод минимального среднего риска, а при известном законе распределения ошибок измерений также метод наименьших квадратов и метод наименьших модулей.

Одним из наиболее простых в вычислительном отношении является метод моментов, который позволяет определить неизвестные характеристики распределения через моменты низших порядков. Количество составленных уравнений равно числу оцениваемых параметров. Совместное решение этих уравнений дает искомые оценки, которые в ряде случаев оказываются малоэффективными. Для повышения точности статистической обработки результатов наблюдений следует задаться структурой исследуемого процесса, подставить полученные оценки в выражение (3) и решить вновь образованную систему одним из более эффективных методов оценивания.

С точки зрения точности получаемых результатов при параметрической идентификации хорошо зарекомендовал себя метод наименьших квадратов, который в общем случае сводится к решению нелинейной системы алгебраических уравнений. Если характер нелинейности допускает линейризацию, следует воспользоваться численными значениями оценок, полученных методом моментов, и разложить нелинейные зависимости в ряд Тейлора относительно этих значений. В данном случае при оценивании параметров используется традиционная система нормальных линейных уравнений Гаусса. Однако на практике более эффективными иногда оказываются другие методы обработки результатов наблюдений.

Метод максимального правдоподобия, требующий более сложных вычислений по сравнению с методом моментов и методом наименьших квадратов, предполагает принятие в качестве оценки неизвестного параметра такого же значения, появление которого на основании имеющихся данных наиболее вероятно. Достоинство оценок, получаемых методом максимального правдоподобия, состоит в том, что они обладают такими важными свойствами, как несмещенность, состоятельность, эффективность и достаточ-

ность. При нормальном законе распределения помех эти оценки совпадают с оценками, полученными методом наименьших квадратов, однако в ряде случаев оценки максимального правдоподобия могут иметь небольшое смещение.

Если число оцениваемых параметров заранее не определено, имеет место комбинированная задача совместного оценивания параметров и состояний. Значения параметров непосредственному наблюдению не доступны, поэтому они выбираются как некоторые функции от выходного сигнала или измеренных координат. При наличии флуктуаций технологического процесса состояние объекта не может быть абсолютно точно измерено, оно должно быть оценено по результатам наблюдений. Задача оценивания состояний может быть решена, если полностью известны динамические свойства (параметры) объекта управления. Если характеристики объекта заранее не известны и должны оцениваться вместе с состояниями, задача значительно усложняется. Для решения подобных задач можно воспользоваться методами оптимальной фильтрации Калмана, которые применимы также для решения следующих задач: оценивание состояний, когда некоторые компоненты вектора состояния не поддаются непосредственному наблюдению; оценивание параметров путем перехода от вектора состояния к вектору параметров; фильтрация, сглаживание и прогнозирование стохастических процессов при оптимальном управлении.

Метод наименьших квадратов является универсальным и достаточно эффективным при оценивании параметров по результатам измерений, содержащих случайные ошибки. Сущность метода состоит в том, чтобы по результатам наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$ определить апостериорные или текущие оценки неизвестных параметров $a_1, a_2, \dots, a_m$ технологического процесса. При этом делается предположение, что риск или ущерб от замены точных неизвестных значений параметров их приближенными значениями $\hat{a}_i, i = \overline{1, m}$ пропорционален квадрату ошибки $\hat{a}^2 = (\hat{a} - a)^2$. Оптимальность решения задачи оценивания понимается в смысле максимального приближения оценки к истинному значению оцениваемого параметра, что сводится к минимизации ошибок оценок $\hat{a}^2 \rightarrow \min$ или усредненного их значения — дисперсии погрешностей оценивания $E[(\hat{a}_i - a_i)^2] \rightarrow \min$. Под оптимальной оценкой в этом случае подразумевают такую лишненную систематической ошибки величину $\hat{a}$, для которой среднее значение риска или ущерба минимально. Отыскание оптимальной оценки в общем случае — задача весьма сложная. На практике эту задачу сужают и чаще всего пользуются линейной функцией от результатов наблюдений, реже — квадратичной функцией.

Приступая к оцениванию параметров, необходимо на основании априорной информации о технологическом процессе выбрать

структуру математической модели, параметры которой определяем по результатам измерений. В простейшем случае структура модели может быть представлена линейной регрессией вида

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_i x_{ij} + \delta_j, \quad j = \overline{1, n} \quad (5)$$

или в векторно-матричном виде

$$y = aX + \delta, \quad (6)$$

где $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$ — вектор ошибок измерений, компоненты которого в большинстве случаев образуют n -мерную систему коррелированных величин, распределенных по нормальному закону.

Для статистической характеристики ошибок измерений должны быть заданы n математических ожиданий $E(\delta_j)$, $j = \overline{1, n}$; n дисперсий $\delta_j^2 = E(\delta_j^2)$, $j = \overline{1, n}$; $n(n-1)/2$ корреляционных моментов $p_{jk} = E(\delta_j \delta_k)$, $j, k = \overline{1, n}$, $j \neq k$, характеризующих попарную корреляцию всех случайных составляющих вектора ошибок измерений, входящих в систему. Дисперсии и корреляционные моменты удобно представить корреляционной матрицей ошибок измерений

$$P = E(\delta \delta^T) = \begin{bmatrix} \delta_1^2 p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} \delta_2^2 & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} p_{n2} & \dots & \delta_n^2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При равноточных измерениях ($\delta_1^2 = \delta_2^2 = \dots = \delta_n^2 = \delta^2$) и некоррелированных между собой ошибках измерений (все недиагональные элементы матрицы P равны нулю) корреляционная матрица измерений (7) имеет вид

$$P = \delta^2 I, \quad (8)$$

где δ^2 — дисперсия измеряемых компонент процесса; I — n -мерная единичная матрица.

В качестве оценок, полученных по методу наименьших квадратов, принимаем такие значения параметров, которые обращают в минимум взвешенную сумму квадратов ошибок

$$g(a, x) = \sum_{j=1}^n p_j^{-1} \delta_j^2 = \sum_{j=1}^n p_j^{-1} [y_j - f_j(a, x)]^2, \quad (9)$$

где p_j — веса измерений, пропорциональные соответствующим дисперсиям. Выражение (9) в векторно-матричном виде может быть представлено квадратичной формой:

$$G(a, x) = \delta P^{-1} \delta^T = [y - f(a, x)] P^{-1} [y - f(a, x)]^T \quad (10)$$

(P — заданная положительно определенная матрица ошибок измерений).

Если все функции $g(\cdot)$ аналитические или достаточно гладкие, необходимым условием минимума среднеквадратичной ошибки измерений является обращение в нуль частных производных

$$\left. \frac{dg(\cdot)}{da_i} \right|_{a_i = \hat{a}_i} = 0, \quad i = \overline{1, m};$$

Дифференцируя $g(\cdot)$ по неизвестным параметрам a_i и приравнявая частные производные $dg(\cdot)/da_i$ нулю при $a_i = \hat{a}_i$, получаем систему нормальных уравнений

$$\left. \frac{dg(\cdot)}{da_i} \right|_{a_i = \hat{a}_i} = 2 \sum_{i=1}^n p_i^{-1} \left(y_i - \sum_{i=1}^m a_i x_{ij} \right) x_{ij} \Big|_{a_i = \hat{a}_i} = 0,$$

которая в обозначениях Гаусса принимает вид

$$\begin{bmatrix} [p^{-1}x_1x_1] & [p^{-1}x_1x_2] & \dots & [p^{-1}x_1x_m] \\ [p^{-1}x_2x_1] & [p^{-1}x_2x_2] & \dots & [p^{-1}x_2x_m] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [p^{-1}x_mx_1] & [p^{-1}x_mx_2] & \dots & [p^{-1}x_mx_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \vdots \\ \hat{a}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [p^{-1}x_1y] \\ [p^{-1}x_2y] \\ \vdots \\ [p^{-1}x_my] \end{bmatrix} \quad (11)$$

Система нормальных уравнений может быть получена из системы условных уравнений (2). Чтобы получить первое уравнение (11), необходимо каждое условное уравнение умножить на коэффициент при первом неизвестном и все условные уравнения просуммировать. Для получения второго уравнения (11) необходимо каждое условное уравнение умножить на коэффициент при втором неизвестном и все условные уравнения сложить и т. д. Число нормальных уравнений равно числу неизвестных.

Линейной системе нормальных уравнений присуща симметричность коэффициентов в левой части и неотрицательность элементов главной диагонали матрицы коэффициентов. Решение системы (11) является, как правило, наиболее трудоемкой частью процедуры оценивания, а поэтому заслуживает особого исследования. Сходимость вычислительной процедуры итерационного процесса существенно зависит от вида минимизируемой функции $g(a, x)$, обусловленности матрицы коэффициентов, размерности решаемой задачи и способа назначения весов.

Воспользовавшись векторно-матричной формой записи, можно получить более компактное выражение нормальной системы уравнений Гаусса:

$$(X^T P^{-1} X) \hat{a} = X^T P^{-1} Y, \quad (12)$$

где $X^T P^{-1} X$ — матрица коэффициентов левой части уравнений (11); $X^T P^{-1} y$ — матрица правых частей системы (11); $\hat{a}$ — матрица-столбец оценок коэффициентов линейной регрессионной модели процесса (5).

При известной корреляционной матрице P ошибок измерений решение уравнения (11)

$$\hat{a} = (X^T P^{-1} X)^{-1} X^T P^{-1} y \quad (13)$$

определяет вектор $\hat{a} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m)$ марковских оценок обобщенного метода наименьших квадратов. В частном случае, если соблюдено соотношение (8), выражение (13) принимает вид

$$\hat{a} = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (14)$$

где $(X^T X)^{-1}$ — корреляционная матрица, диагональные элементы которой — дисперсии, недиагональные элементы — ковариации коэффициентов регрессии.

Когда факторы $x_1, x_2, \dots, x_n$ не коррелированы между собой, ковариации оказываются равными нулю и матрица $(X^T X)^{-1}$ становится диагональной. В задачах оперативного контроля такая ситуация желательна, так как в данном случае регрессионная модель может быть непосредственно использована для управления процессом. Если обе части векторной модели (6) умножить на $(X^T X)^{-1} X^T$, с учетом соотношения (14) получим вектор ошибок оцениваемого параметра

$$\tilde{a} = \hat{a} - a = (X^T X)^{-1} X^T \delta, \quad (15)$$

корреляционная матрица которого

$$\begin{aligned} \psi &= E[\tilde{a}\tilde{a}^T] = \\ &= E\{[(X^T X)^{-1} X^T \delta][(X^T X)^{-1} X^T \delta]^T\} = (X^T X)^{-1} P. \end{aligned} \quad (16)$$

Метод максимального правдоподобия. Пусть $x_1, x_2, \dots, x_n$ представляют собой результаты наблюдений некоторой случайной переменной X , которая может быть непрерывной или дискретной. Для вычисления оценок методом максимального правдоподобия необходимо знать зависимость $f(a, x)$, которая в первом случае представляет плотность вероятности, во втором — функцию распределения вероятностей измеряемого случайного процесса. Распределение переменной x зависит от параметра a , значение которого оцениваем по случайной выборке.

Если отдельные наблюдения статистически независимы, совместная плотность распределения вероятности выборки, представляет собой функцию правдоподобия,

$$l(a, x) = \prod_{i=1}^n f(a, x_i). \quad (17)$$

Если X — дискретная случайная величина, то $l(a, x)$ — вероятность получения в выборке таких результатов вычисления, которые действительно получены при условии, что параметр распределения имеет значение a . Если X — непрерывная случайная величина, то $l(a, x)$ — суммарная плотность вероятности получения именно таких результатов, какие дала выборка.

Итак, функция правдоподобия может быть истолкована как вероятность (или плотность вероятности) получения именно таких результатов, которые наблюдались в действительности. Эта вероятность $l(a, x)$ в общем случае зависит от неизвестных па-

параметров $a_1, a_2, \dots, a_m$, значения которых не могут быть точно определены по результатам случайной выборки. Тем не менее случайные события, вероятность которых велика, наступают в среднем чаще маловероятных событий. А поэтому, хотя значения $a_i, i = \overline{1, m}$ и неизвестны, можно полагать, что случайное событие, состоящее в совместном появлении в выборке значений $x_j, j = \overline{1, n}$, было весьма вероятно, и это наиболее вероятное событие произошло. Здесь весьма логичным является допущение, согласно которому значения параметров таковы, что вероятность получения наблюдений, полученных в выборке, является максимальной. В качестве оценки максимального правдоподобия $\hat{a}$ принимаем значение параметра a , при котором функция $l(a, x)$ достигает абсолютного максимума.

Алгоритм оптимального апостериорного оценивания по методу максимального правдоподобия определяется функцией $l(a, x)$, которая зависит от закона распределения ошибок измерения $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_n)$. Если последние рассматривать как непрерывную случайную величину с нормальным законом распределения и заданной плотностью вероятности $q(\delta)$, то функция правдоподобия

$$l(a, x) = q(\delta) = \frac{1}{\sigma (2\pi)^{n/2} \sqrt{P}} \exp \times \\ \times \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [y - f(a, x)] P^{-1} [y - f(a, x)]^T \right\}, \quad (18)$$

где P — заданная положительно определенная матрица размерности $n \times n$; σ^2 — положительный множитель, учитываемый в процессе обработки результатов наблюдений. Если технологический процесс описывается уравнением линейной регрессии (6), функция правдоподобия (18)

$$l(a, x) = \frac{1}{\sigma (2\pi)^{n/2} \sqrt{P}} \exp \times \\ \times \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} [y - aX] P^{-1} [y - aX]^T \right\}. \quad (19)$$

Для дифференцируемой относительно a_i функции $l(a, x)$ необходимое и достаточное условия оптимальности

$$\left. \frac{\partial l(a, x)}{\partial a_i} \right|_{a_i = \hat{a}_i} = 0, \quad \frac{\partial^2 l(a, x)}{(\partial a_i)^2} < 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (20)$$

Вычисление оценок максимального правдоподобия сводится в общем случае к решению системы нелинейных уравнений (20) относительно неизвестных параметров $a_i, i = \overline{1, m}$ в предположении, что функция $l(a, x)$ аналитическая или достаточно гладкая. Если $l(a, x)$ не дифференцируема относительно a_i , нужно выбрать или разработать численные методы нахождения экс-

тремума, что является более сложной задачей. Для максимизации выражения (19) необходимо минимизировать

$$G(a, x) = (y - aX) P^{-1} (y - aX)^T, \quad (21)$$

или в скалярной форме

$$g(a, x) = \sum_{i=1}^n p_i^{-1} \left(y_i - \sum_{l=1}^m a_l x_{il} \right)^2. \quad (22)$$

Выполнив дифференцирование выражения (21) по неизвестным параметрам и приравняв частные производные нулю при $a_i = \hat{a}_i$, $i = 1, m$, получим нормальную систему уравнений Гаусса. При этом подтверждается положение, что для нормального закона распределения ошибок измерения алгоритмы максимального правдоподобия и наименьших квадратов полностью совпадают. Решение уравнений правдоподобия встречает те же серьезные затруднения, что и нормальная система уравнений Гаусса. Хорошие результаты оценивания получаем, когда число измерений достаточно велико или ошибки измерений достаточно малы. В противном случае определитель системы близок к нулю и последняя оказывается плохо обусловленной, что может привести к большим ошибкам в оценке параметров модели технологического процесса. В этом случае особый интерес представляет выбор метода и алгоритма оценивания плохо обусловленной системы.

Рекуррентные методы оценивания. Совместная обработка всех результатов наблюдений (апостериорное оценивание параметров) для большого числа измерений и сложной математической модели технологического процесса вызывает серьезные вычислительные трудности, которые связаны с большой затратой машинного времени. Поэтому при оперативном контроле и управлении технологическими процессами представляет интерес текущее оценивание, когда по имеющейся в данный момент информации отыскивается оценка, уточняемая по мере поступления новых данных. При выводе основных соотношений рекуррентного метода оценивания воспользуемся методологией работ [2, 3], приняв, что ошибки измерения представляют собой нестационарный случайный процесс с нормальным законом распределения.

Пусть технологический процесс описывается последовательностью результатов наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$, полученных в моменты времени $t_1 < t_2 < \dots < t_n$. При апостериорном оценивании вектор оценок $\hat{a}_n$ параметров зависит от всей совокупности результатов наблюдений. Однако в ряде случаев представляется возможным заменить алгоритм полной совместной обработки рекуррентным алгоритмом текущего оценивания вида

$$\hat{a}_n = g(\hat{a}_{n-1}, x_n), \quad (23)$$

в правую часть которого входит не вся последовательность наблюдений, а лишь измерение x_n , поступившее в последний мо-

мент времени t_n . Влияние всех предыдущих измерений учитывается оценкой $\hat{a}_{n-1}$ предыдущего шага в момент t_{n-1} .

Процесс получения последовательно уточняемых оценок составляет рекуррентный метод параметрической идентификации. При использовании этого метода отпадает необходимость в запоминании большого объема результатов наблюдений, поскольку получение оценок распадается на ряд повторяющихся однотипных вычислений по формуле (23). При этом может быть существенно сокращена временная задержка между моментом поступления последнего измерения и выдачей соответствующей оценки, что при оптимальном управлении технологическим процессом может значительно повысить качество принимаемых решений.

Чтобы получить алгоритм текущего оценивания (23), запишем функцию правдоподобия $l(a, x)$ в виде совместной плотности вероятности

$$l(a, x) = q(\tilde{a}, \delta) = q(\tilde{a}) q(\delta) \quad (24)$$

векторов ошибки оценки параметров $\tilde{a} = \hat{a} - a$ и ошибки измерения $\delta = y - f(a, x)$. Если ошибки $\tilde{a}$, δ распределены по нормальному закону, функция правдоподобия (24) после $(n+1)$ -го измерения

$$l(a, x) = \frac{1}{\sigma_1 (2\pi)^{m/2} \sqrt{\psi_n}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_1^2} (\hat{a} - a) \psi_n^{-1} (\hat{a} - a)^T \right\} \times \\ \times \frac{1}{\sigma_2 (2\pi)^{n/2} \sqrt{P_{n+1}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_2^2} [y - f(a, x)] P_{n+1}^{-1} [y - f(a, x)]^T \right\}, \quad (25)$$

где $\psi_n = E[\tilde{a}_n, \tilde{a}_n^T]$ — корреляционная матрица ошибок оценивания; $P_{n+1} = E[\delta_{n+1}, \delta_{n+1}^T]$ — корреляционная матрица ошибок измерения на $(n+1)$ -м шаге наблюдения.

Из выражения (25) непосредственно следует, что отыскание максимума $l(a, x)$ сводится к минимизации функции

$$Q(a, x) = 1/2 [(\hat{a}_n - a) \psi_n^{-1} (\hat{a}_n - a)^T + \\ + (y_{n+1} - aX_{n+1}) P_{n+1}^{-1} (y_{n+1} - aX_{n+1})^T], \quad (26)$$

где $f(a, X_{n+1}) = aX_{n+1}$ — векторная модель технологического процесса, заданного линейным уравнением регрессии. Для получения системы уравнений правдоподобия продифференцируем выражение (26) по векторному параметру a и результат приравняем нулю при $a = \hat{a}_{n+1}$:

$$\left. \frac{dQ(a, x)}{da} \right|_{a=\hat{a}_{n+1}} = \psi_n^{-1} (\hat{a}_{n+1} - \hat{a}_n) - X_{n+1}^T P_{n+1}^{-1} (y_{n+1} - \hat{a}_{n+1} X_{n+1}) = 0,$$

откуда

$$\hat{a}_{n+1} = \hat{a}_n + \psi_{n+1} X_{n+1}^T P_{n+1}^{-1} (y_{n+1} - X_{n+1} \hat{a}_n). \quad (27)$$

Здесь $\psi_{n+1} = E(\hat{a}_{n+1}, \hat{a}_{n+1}^T)$ — корреляционная матрица ошибок оценок параметров на $(n+1)$ -м шаге оценивания

$$\psi_{n+1} = \psi_n - \psi_n X_{n+1}^T (X_{n+1} \psi_n X_{n+1}^T + P_{n+1})^{-1} X_{n+1} \psi_n. \quad (28)$$

Рекуррентные соотношения (27), (28) позволяют получить вектор оценок параметров и корреляционную матрицу ошибок оценивания параметров после $(n+1)$ -го измерения, если известны значения $\hat{a}_n$, ψ_n , X_{n+1} , P_{n+1} , y_{n+1} . По мере поступления новой информации оценки $\hat{a}_{n+1}$ уточняются. Для реализации вычислительной процедуры (27), (28) необходимо знать начальные значения $\hat{a}_0$ и $P_0 = D(x_0)/\sigma^2$. Эти величины могут быть приняты на основании априорной информации о векторе наблюдений $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. При отсутствии или недостатке этих сведений для определения величин $\hat{a}_0$, P_0 можно использовать начальную часть апостериорной информации. Применение рекуррентных алгоритмов оценивания целесообразно в тех случаях, когда требуется оперативное решение рассматриваемой задачи.

При сравнении апостериорного и текущего оценивания параметров следует отметить, что, хотя текущее оценивание обеспечивает значительно меньшую задержку времени между моментом поступления последнего измерения и выдачей оцениваемого значения, общее машинное время, затраченное на получение текущей оценки с учетом всех предыдущих оценок, оказывается большим. Поэтому во многих случаях целесообразно применение апостериорного оценивания с использованием алгоритмов совместной обработки. При текущем оценивании точность определяемых параметров может заметно снижаться. Это объясняется тем, что обрабатываются все измерения, в том числе случайные выбросы, которые при апостериорном оценивании, как правило, исключаются. В результате теряется основное преимущество рекуррентных алгоритмов, способных выдавать значение оцениваемого параметра с использованием оптимального объема измерительной информации. Рекуррентные методы оценивания целесообразно использовать в системах оперативного контроля и управления технологическими процессами, когда последние достаточно точно описываются линейной регрессионной моделью, а измерительная информация содержит минимальное количество случайных выбросов.

Итак, при параметрической идентификации применяется метод моментов, метод наименьших квадратов, максимального правдоподобия и оптимальная калмановская фильтрация. Метод моментов ввиду малой эффективности получаемых оценок применяется как вспомогательный для наложения первого приближения оцениваемых параметров с последующим уточнением их другими, более эффективными методами. Метод наименьших квадратов при оценивании параметров используется в том случае, если априорно известна структура модели технологического процесса, ошибки измерения можно рассматривать как стационарный случайный процесс, а все результаты наблюдений равноценны в информационном отношении. Если ошибки измерения представляют

нестационарный случайный процесс с известными статистическими характеристиками (например, законом измерения дисперсии), то такие измерения целесообразно обрабатывать с учетом их весовых коэффициентов p_i^{-1} , зависящих от дисперсии ошибок измерений. В этом случае параметры оцениваем методом максимального правдоподобия, который при весьма общих условиях, налагаемых на функцию правдоподобия, дает асимптотически эффективные, асимптотически несмещенные, состоятельные и асимптотически нормальные оценки.

Преимущество метода наименьших квадратов состоит в том, что он не требует какой бы то ни было априорной информации о статистических свойствах переменных, за исключением конечности величины их дисперсий. Наличие сведений о законе распределения шумов измерений позволяет получать более точные значения оценок неизвестных параметров. Величина дисперсии существенно зависит от количества используемых при обработке наблюдений, с увеличением последних точность оценок повышается. При значительном разбросе результатов измерений количество наблюдаемых значений целесообразно увеличить в 5—10 раз по сравнению с числом оцениваемых параметров. Избыточные измерения позволяют существенно повысить точность и достоверность результатов оценивания по сравнению с оценками по минимуму данных.

При использовании метода максимального правдоподобия в качестве априорной информации необходимо знать распределение вероятностей случайных величин, что может стать препятствием в случае его применения при обработке информации неизученного технологического процесса. Этого недостатка лишен метод наименьших квадратов, который непосредственно вытекает из метода максимума правдоподобия при нормальном законе распределения результатов наблюдений.

Приведенные методы параметрической идентификации технологических процессов используются при построении адаптивных моделей прогнозирования газопотребления крупными городами и промышленными предприятиями, при исследовании эффективности функционирования сложных электромеханических и электронных систем. Программы составлены на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЭВМ «Минск-32» и частично сданы в фонд алгоритмов и программ УССР.

Список литературы: 1. Авраменко В. П. К вопросу статистического оценивания параметров технологических процессов. — В кн.: Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Вып. 46. Харьков, 1978, с. 134—141. 2. Раскин Л. Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. М., «Сов. радио», 1976. 344 с. 3. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М., «Наука», 1976. 416 с.

УДК 62—50

В. П. АВРАМЕНКО, канд. техн. наук
Харьковский институт радиоэлектроники

К ВОПРОСУ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЛОХО ОБУСЛОВЛЕННЫХ СИСТЕМ

Задача оптимального управления сложным технологическим процессом включает в себя два взаимосвязанных этапа: отыскание численных значений параметров, характеризующих состояние системы, и принятие наилучшего управляющего воздействия. Исходной информацией для решения задачи идентификации служат измерения параметров системы или ее реакция на различные входные воздействия. Обычно измерения содержат случайные

ошибки; кроме того, сама система часто бывает подвержена воздействию случайных возмущений. В ряде случаев на основании априорной информации удастся сформулировать правдоподобную гипотезу о модели системы, тогда для полного математического описания системы необходимо оценить ее параметры.

Если в качестве исходной принять полиномиальную модель системы и набрать достаточно большую статистику, то, воспользовавшись одним из алгоритмов оценивания, можно в принципе определить неизвестные параметры модели. Наиболее распространенным методом оценивания является метод наименьших квадратов, универсальный по своей природе и в ряде случаев не требующий никакой априорной информации. При этом для получения оценок параметров необходимо решить нормальную систему уравнений Гаусса, которая дает хорошие результаты при достаточно большом количестве измерений и при малых ошибках измерений. В противном случае определитель системы оказывается близким к нулю и система становится плохо обусловленной, что может привести к большим ошибкам в оценке параметров. Приведенные ниже исследования выясняют сущность плохой обусловленности систем. Даются практические рекомендации по выбору работоспособных алгоритмов параметрической идентификации.

Плохая обусловленность системы. Необходимым условием успешного функционирования автоматической системы или вычислительной процедуры решения некоторой задачи является устойчивость. Система считается устойчивой, если под действием внешних возмущений она переходит из одного конечного состояния в другое за конечное время. Скорость такого перехода зависит от инерционных свойств системы, а длительность переходного процесса определяется постоянными времени системы, которые обратно пропорциональны корням характеристического уравнения $|A - \lambda E| = (-1)^n (\lambda^n - a_1 \lambda^{n-1} - \dots - a_{n-1} \lambda - a_n) = (-1)^n P_n(\lambda) \quad (1)$,

где A — матрица коэффициентов системы; E — единичная матрица размера $n \times n$; $P_n(\lambda)$ — собственный многочлен матрицы A ,

$$P_n(\lambda) = \lambda^n - a_1 \lambda^{n-1} - \dots - a_{n-1} \lambda - a_n, \quad (2)$$

корни которого представляют собой собственные значения матрицы A .

Задача нахождения всех корней уравнения (2) в линейной алгебре называется полной проблемой собственных значений. Коэффициенты a_i в точности до знака являются суммами всех миноров определителя матрицы A , опирающихся на главную диагональ. Для нахождения собственных значений действительной симметрической матрицы системы может быть применен метод ее преобразования к диагональной форме, разработанный Якоби и развитый фон Нейманом для больших вычислительных процедур. Большинство методов, дающих решение этой задачи,

включает предварительное определение коэффициентов характеристического полинома, а затем решение алгебраического уравнения n -го порядка одним из приближенных методов.

Для вычисления коэффициентов полинома (2) можно воспользоваться алгоритмом Бохера [1]:

$$a_1 = -tr_1; \quad a_2 = -1/2(a_1 tr_1 + tr_2); \quad a_3 = -1/3(a_2 tr_1 + a_1 tr_2 + tr_3);$$

$$a_n = -1/n(a_{n-1} tr_1 + a_{n-2} tr_2 + \dots + a_1 tr_{n-1} + tr_n).$$

Здесь $tr_1 = tr A = (a_{11} + a_{22} + \dots + a_{nn}) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$ — след матрицы A ; $tr_k = tr A^k$ — след матрицы A , умноженной k раз на себя. Для контроля правильности вычисления коэффициентов $a_1, a_2, \dots, a_n$ матрицы A можно воспользоваться соотношениями, вытекающими из теоремы Виетта: $P_n(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \dots (\lambda - \lambda_n)$ при $\lambda = 0$, $P_n(0) = (-1)^n(\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n)$. Отсюда $\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n = \det A$, т. е. произведение собственных значений равно определителю матрицы A . Если в выражениях (1), (2) положить $\lambda = 0$, получим $P_n(0) = \det(-A) = a_n$ или $a_n = (-1)^n \det A$.

Один из эффективных способов приближенного вычисления корней полинома $P_n(\lambda)$ — способ Ньютона. Если исходное приближение корня λ^* довольно близко к искомому значению, то вычислительная процедура $\lambda^{k+1} = \lambda^k - P_n(\lambda_k)/P_n'(\lambda^k)$, $k = 0, 1, \dots$ является устойчивой и сходится к λ^* с квадратичной скоростью. Собственные значения λ_i , $i = \overline{1, n}$ в общем случае могут быть комплексными величинами $\lambda_i = \operatorname{Re}(\lambda_i) + j \operatorname{Im}(\lambda_i)$, где j — мнимая единица.

Устойчивость динамической системы или вычислительной процедуры в соответствии с методами Ляпунова определяется по собственным значениям матрицы A . Если все собственные значения матрицы A имеют отрицательные вещественные части $\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0$, $i = \overline{1, n}$ при $\operatorname{Im}(\lambda_i) = 0$, система (процедура) устойчива и притом асимптотически. Если все собственные значения матрицы A имеют отрицательные вещественные части $\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0$, $i = \overline{1, n}$, а для некоторых пар k $\operatorname{Im}(\lambda_i) \neq 0$, в системе имеет место сходящийся колебательный процесс. Если некоторые собственные значения матрицы A имеют нулевую вещественную часть $\operatorname{Re}(\lambda_i) = 0$, система находится на границе устойчивости и производит незатухающие колебания вблизи равновесного состояния. Если среди собственных значений матрицы A имеется хотя бы одно с положительной вещественной частью $\operatorname{Re}(\lambda_i) > 0$, система является неустойчивой, а вычислительные процессы расходящимися. Таким образом, необходимым условием устойчивости системы (вычислительной процедуры) является соотношение

$$\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Введем понятие постоянной времени $\tau_i = -1/\lambda_i$ для случая, когда $\operatorname{Im}(\lambda_i) = 0$ для всех $i = 1, n$, т. е. для случая отсутствия колебательных переходных процессов в системе. Среди постоянных времени особый интерес представляют максимальная $\tau_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} \tau_i = 1/\min_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i|$ и минимальная $\tau_{\min} = \min_{1 \leq i \leq n} \tau_i = 1/\max_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i|$ постоянные времени. Отношение $\tau_{\max}$ к $\tau_{\min}$ является числом обусловленности по Тодду: $\rho(A) = \tau_{\max}/\tau_{\min} = \max_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i|/\min_{1 \leq i \leq n} |\lambda_i|$.

Физическую, техническую или математическую систему с большим числом обусловленности $\rho(A)$ принято называть плохо обусловленной. Если эта мера имеет небольшую величину, то систему или вычислительную процедуру принято считать хорошо обусловленной. От числа обусловленности существенно зависит эффективность применения ряда численных методов идентификации и оптимизации. Поэтому важным вопросом является вычисление оценки числа обусловленности, величина которого позволит выбрать наиболее целесообразный алгоритм решения конкретной задачи идентификации.

При решении многих научных и технических задач (изучение устойчивости системы или сходимости алгоритма) сведения о всех собственных значениях не являются необходимыми. Можно ограничиться максимальным и минимальным значениями корней полинома $P_n(\lambda)$, а в ряде случаев достаточно указать границы, в которых лежат собственные значения. Все такого рода задачи называются частичными проблемами собственных значений и для каждой из них создаются свои методы, позволяющие избежать излишней затраты труда. Приступая к нахождению корней собственного многочлена $P_n(\lambda)$, сначала необходимо: определить число корней, которое имеет характеристическое уравнение; найти область существования корней, т. е. установить верхнюю и нижнюю границу расположения корней. Затем можно приступить к отделению корней и их уточнению. Для приближенного оценивания степени обусловленности системы второй этап необязателен.

Согласно основной теореме алгебры многочлен $P_n(\lambda)$ степени n ($n \geq 1$) с любыми числовыми коэффициентами имеет n корней, если каждый из корней считать столько раз, какова его кратность. Определить число действительных отрицательных (положительных) корней характеристического уравнения

$$P_n(\lambda) = a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n = 0 \quad (5)$$

можно с помощью правила Декарта: количество действительных отрицательных корней уравнения (5) с действительными коэффициентами равно числу перемен знака в последовательности коэффициентов $P_n(-\lambda)$ или на четное число меньше (равные нулю коэффициенты не учитываются).

Для приближенного определения области существования корней уравнения (5) можно воспользоваться правилом кольца.

Пусть уравнение $P_n(\lambda) = 0$ имеет действительные коэффициенты $a_0, a_1, \dots, a_n$ и $Q = \max\{|a_0|, |a_1|, \dots, |a_{n-1}|\}$, $S = \max\{|a_1|, |a_2|, \dots, |a_n|\}$. Тогда корни уравнения находятся внутри кругового кольца $r < |\lambda| < R$ где

$$r = \frac{1}{1 + Q/|a_n|}, \quad R = 1 + S/|a_0|.$$

При этом $-r$ — верхняя, $-R$ — нижняя граница отрицательных корней уравнения $R_n(\lambda) = 0$, r, R — соответственно нижняя и верхняя границы положительных корней. Величина r определяет $\min|\lambda_i|$, $R = \max|\lambda_i|$. Полученные границы корней можно уточнить по правилу Штурма, методом Лагранжа или методом Ньютона. Подставляя значения $\max|\lambda_i|$, $\min|\lambda_i|$ в формулу (4), определяем число обусловленности системы по Тодду.

Для ориентировочного оценивания постоянных времени $\tau_{\max}$ и $\tau_{\min}$ или максимального и минимального значений собственных значений матрицы A используются инженерные приемы и научные методы. Инженерные приемы являются весьма ориентировочными, дают возможность определить порядок постоянных времени и числа обусловленности, не прибегая к вычислению собственных значений матрицы. Они позволяют судить о величинах $\tau_{\max}$, $\tau_{\min}$ на основании физических процессов в системе. В электромеханических и электронных цепях при определении $\tau_{\min}$ необходимо выделить малые емкости (конденсаторы, резервуары, газгольдеры) схемы, которые перезаряжаются через малые сопротивления. В качестве $\tau_{\min}$ принимают наименьшую из постоянных времени, подсчитанных для нескольких выделенных емкостей. При оценивании $\tau_{\max}$ выделяем наибольшие емкости, перезаряжающиеся через наибольшие сопротивления. В качестве $\tau_{\max}$ принимаем максимальную из величин, подсчитанных таким образом. Полученные оценки $\tau_{\max}$, $\tau_{\min}$ являются ориентировочными, однако опытный инженер в этих оценках может добиться довольно высокой точности.

Оценить обусловленность системы можно также по величине определителя $\det A$. Для однотипных систем в одном и тем же порядке уравнений чем больше определитель, тем лучше обусловленность системы. Признаки хорошей обусловленности линейных алгебраических систем уравнений, в том числе нормальных гауссовских, следующие: диагональные элементы матрицы по абсолютной величине значительно превосходят недиагональные элементы; недиагональные элементы группируются вблизи главной диагонали, а удаленные от нее равны нулю;

свободные члены уравнений невелики по абсолютной величине; при прочих равных условиях обусловленность улучшается с уменьшением размерности системы.

Алгоритмы идентификации. Процедура оценивания статических параметров технологических процессов в большинстве случаев сводится к решению системы нормальных уравнений вида

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1;$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2; \quad (6)$$

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n = b_n,$$

или в матричной форме

$$Ax = b, \quad (7)$$

где A — квадратная матрица коэффициентов размера $n \times n$; x — вектор-столбец неизвестных параметров размера $n \times 1$; b — матрица-столбец свободных членов размера $n \times 1$.

Систему уравнений (6) или (7) решаем чаще всего методом Гаусса или Гаусса—Зейделя, которые дают приемлемые результаты для хорошо обусловленных матриц коэффициентов. При параметрической идентификации в условиях нормальной эксплуатации применительно к системам экстремального управления матрица A получается, как правило, плохо обусловленной, что значительно усложняет получение решения системы нормальных уравнений, поскольку вычислительная процедура замедляется. В ряде случаев эти методы решения нецелесообразны.

Избавиться от названных затруднений можно двумя путями: изменением внутренних свойств системы или выбором алгоритмов решения, малочувствительных к обусловленности. В первом случае к объекту могут быть приложены небольшие активные возмущающие воздействия — пробные сигналы или на характеристику объекта накладываются небольшие отклонения — зубцы. Чем больше величина пробных сигналов или зубцов характеристики, тем лучше обусловленность системы. На величине обусловленности существенно сказывается правильный выбор обучающей последовательности, требующий, чтобы результаты наблюдений не повторяли друг друга.

Применение методов регуляризации позволяет избавиться от плохой обусловленности и неустойчивости некорректно поставленных задач идентификации. Получаемые при этом ошибки решения будут такого же порядка, как и точность задания исходных данных. С информационной точки зрения некорректность решения означает, что содержащейся в измерениях информации недостаточно для получения устойчивой оценки. Накладывая те или иные ограничения на допустимые решения, можно получить различные регуляризованные алгоритмы, в частности, если ограничения накладываются на гладкость функции, можно воспользоваться методом регуляризации по Тихонову.

Задача оценивания параметров и состояний технологического процесса при неособой матрице коэффициентов, в принципе, может быть решена различными методами и алгоритмами. Однако технические возможности ЭВМ второго поколения, особенно управляющих машин, при плохой обусловленности систем существенно ограничивают класс моделирующих алгоритмов. При оценивании состояний применяется алгоритм решения системы (7)

с непосредственным обращением матрицы коэффициентов. При оценивании параметров более приемлемыми оказываются алгоритмы Гаусса, алгоритмы безусловной минимизации, алгоритмы стохастической аппроксимации, алгоритмы селекции данных на основе метода группового учета аргументов Ивахненко, а также регуляризованные, адаптивные и другие алгоритмы оценивания. Рассмотрим некоторые из них, применяемые автором на практике.

Алгоритм в обращении матрицы коэффициентов. Решение системы нормальных уравнений (7) можно представить в виде

$$x = A^{-1}b, \quad (8)$$

требующем обращения исходной матрицы коэффициентов A . Использование обратной матрицы A^{-1} для получения решения (8) в большинстве случаев нецелесообразно, поскольку объем вычислений оказывается существенно большим, чем при решении системы уравнений с n неизвестными. Однако при оперативном контроле и управлении с идентификацией состояний на интервале стационарности параметров требуется многократное решение уравнения (7) с различными свободными членами. Для получения x достаточно один раз вычислить A^{-1} и умножить ее на матрицу свободных членов b . В подобных случаях вычисление обратной матрицы целесообразно.

Обратную матрицу в выражении (8) можно вычислить лишь в том случае, если она устойчива, т. е. если малым изменениям элементов исходной матрицы соответствуют малые изменения в элементах обратной матрицы. Для устойчивости A^{-1} требуется, чтобы определитель исходной матрицы A был не слишком мал. Если вычисленное значение определителя $\det A$ значительно

меньше оценки Адамара [5] $\Delta d = \sqrt{\prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2}$, обратная матрица будет малоустойчивой.

Если элементы обратной матрицы достаточно велики, что бывает всякий раз при малом определителе, то незначительные ошибки в элементах исходной матрицы влекут за собой значительные изменения в элементах обратной матрицы. Исходную систему принято считать плохо обусловленной, когда обратная матрица является неустойчивой. Поскольку результаты наблюдений плохо обусловленных систем заданы приближенно, матрица A^{-1} может находиться на границе устойчивости или оказаться неустойчивой. Если переходная матрица A является плохо обусловленной, это свидетельствует о том, что физическая или техническая система обладает малым запасом устойчивости. В этом случае малым изменениям коэффициентов при дрейфе параметров или свободных членов и флуктуации управляющих воздействий соответствуют большие изменения решения — изменения выходных координат системы.

Для получения A^{-1} плохо обусловленной системы можно применить алгоритм обращения с уточнением элементов обратной матрицы. Вследствие погрешностей вычисления матрица N , полученная в результате процедуры обращения, может не достаточно близко совпадать с обратной матрицей A^{-1} . Степень отклонения вычисленной матрицы от ее точного значения определяется разностью между произведением AN и единичной матрицей E , которой это произведение должно равняться при точном значении $N = A^{-1}$, т. е. $R = E - AN$. Приближенное значение обратной матрицы уточняется с помощью итерационных процедур.

Алгоритмы Гаусса. При решении систем линейных нормальных уравнений наибольшее распространение получили алгоритмы последовательного исключения переменных, идея и вычислительная схема которых были заложены К. Ф. Гауссом. Алгоритмы этого типа с помощью элементарных преобразований позволяют перевести исходную систему уравнений в эквивалентную систему, решение которой не составляет труда. Метод исключения имеет много вычислительных схем, которые сводятся к построению эквивалентной системы с верхней треугольной матрицей коэффициентов, к разбиению исходной системы на две подсистемы с верхней и нижней треугольными матрицами, к преобразованию матрицы коэффициентов A в единичную матрицу E . Элементы вектора столбца свободных членов b дают в этом случае искомые решения.

Одной из наиболее распространенных является схема единственного деления. Из системы (6) выбирают какое-либо уравнение и какое-либо неизвестное в нем. После перекодировки индексов и перестановки уравнений в системе можно считать, что выбранное уравнение и неизвестная координата являются первыми.

Основное условие выбора состоит в том, чтобы коэффициент при выбранном неизвестном не был равен нулю. Если все члены первого уравнения разделить на $a_{11} \neq 0$, получим первое элиминационное уравнение

$$x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1, \quad (9)$$

где $a_{ij} = a_{ij}/a_{11}$ ($j \geq 2$), $b_i = b_i/a_{11}$. Если выражение (9) умножить на $-a_{i1}$ ($i = \overline{2, n}$) и результат прибавить к остальным уравнениям (6), получим систему $(n-1)$ -го порядка. Проведя аналогичную вычислительную процедуру, получим второе элиминационное уравнение $x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$, и останется система $(n-2)$ линейных уравнений. После n -го шага вычислений

получим последнее уравнение $x_n = \overbrace{b_n}^n$, которое непосредственно дает значение x_n . Из предпоследнего элиминационного уравнения

находим значения x_{n-1} и так далее в обратном порядке вычисляем $x_{n-2}, \dots, x_1$.

Таким образом, алгоритм единственного деления Гаусса имеет два этапа решения: 1) *прямой ход*, в результате применения которого строим вспомогательную систему элиминационных уравнений с верхней треугольной матрицей; 2) *обратный ход*, состоящий в получении решений системы $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$. На каждом шаге прямого хода выбираем ведущий элемент по некоторому правилу: либо это максимальный элемент матрицы коэффициентов, либо максимальный элемент строки или столбца. Если ведущий элемент близок к нулю, деление уравнения на него может привести к большим новым коэффициентам. В обратном ходе на эти коэффициенты умножаем неточные значения неизвестных, что может привести к росту погрешностей и быстрой потере точности. Такое положение является следствием плохой обусловленности системы.

Вторая наиболее распространенная модификация метода исключения Гаусса основана на возможности однозначного разложения невырожденной матрицы системы A на две треугольные матрицы: $A = LU$, где L — нижняя треугольная, U — верхняя треугольная. Каждая из матриц L, U является невырожденной, поэтому решение системы нормальных уравнений $Ax = b$ может быть сведено к последовательному решению двух систем с треугольными матрицами $Ly = b, Ux = y$ при $LU = A$, что является более простой задачей, поскольку неизвестные находим последовательно. Однозначное LU -разложение возможно лишь в том случае, если главные миноры матрицы A не равны нулю, а элементы l_{nn}, u_{nn} матриц L, U связаны соотношением [4] $l_{nn}u_{nn} = a_{nn} - \chi y$, причем на каждом шаге разложения необходимо одному из элементов (l_{nn} и u_{nn}) присваивать некоторое значение, отличное от нуля. Чаще всего предполагаем, что одна из треугольных матриц имеет единичную диагональ, например $u_{ii} = 1, i = \overline{1, n}$. Недиagonальные элементы матриц L, U вычисляем с помощью рекуррентных соотношений [2, 4]

$$l_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}u_{kj} \quad (k \geq i);$$

$$u_{ij} = 1/l_{ii} \left(a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}u_{kj} \right) \quad (i < j).$$

При использовании этих формул для $j = \overline{1, n}$ декомпозиция матрицы A на две треугольные L, U выполняется за n шагов. Приведенный алгоритм не дает полной уверенности, что решение будет получено. Даже при хорошо обусловленной матрице A вычислительный процесс может оказаться неустойчивым. Чтобы избежать этого, в алгоритме применяем комбинацию метода частных ведущих элементов и уравнивание матрицы [2] или используем дополненный метод гауссова исключения [5].

Релаксационные алгоритмы безусловной минимизации. При параметрической идентификации управляемых систем применяются прямые (наиболее часто итерационные и градиентные) и косвенные (квазилинеаризация, инвариантное погружение) методы. Оценивание параметров прямыми методами сводится к минимизации некоторого критерия качества (функция штрафа, сумма квадратов невязок) $Q(x)$, косвенными методами — к решению двухточечной краевой задачи, у которой на каждой итерации используются принципы теории оптимального управления [1, 4].

Простейший итерационный метод — метод последовательных приближений — состоит в том, что, приняв некоторое начальное приближение $x^0 = \{x_1^0, \dots, x_n^0\} \in X$, последующие приближения $x^1, \dots, x^k, \dots$ определяем по формуле

$$x^{k+1} = T_k x^k, \quad (10)$$

где T_k — оператор, действующий из X в X . Если оператор удовлетворяет условию Липшица с константой $q < 1$, уравнение (10) имеет единственное решение x , к которому сходятся последовательные приближения x^k . Применение итерационных методов дает хорошую сходимость процесса решения в том случае, если начальное приближение находится в достаточно малой окрестности точки x^* . На практике это условие часто не соблюдается, что приводит к расходящемуся процессу.

Если минимизируемая функция $Q(x)$ определена во всем n -мерном евклидовом пространстве E_n и имеет непрерывные частные производные до m -го порядка, вычислительную схему для получения последовательных приближений $x^1, \dots, x^k, \dots$ строим в общем случае по формуле $x^{k+1} = T_k[x^0, \dots, x^k; Q(x^0), \dots, Q(x^k); \nabla Q(x^0), \dots, \nabla Q(x^k); \dots; \nabla^m Q(x^0), \dots, \nabla^m Q(x^k)]$, где $\nabla^l Q(\cdot)$ — вектор частных производных l -го порядка ($1 \leq l \leq m$); T_k — оператор преобразования, который дает основную характеристику метода (одноступенчатые, двухступенчатые, многоступенчатые).

В методах спуска оператор T_k выражается соотношением

$$x^{k+1} = x^k - \alpha_k p_k, \quad (11)$$

где α_k — длина шага; p_k — направление спуска.

Если каждое следующее приближение выбирать из условия $Q(x^{k+1}) < Q(x^k)$ для $k = 0, 1, \dots$, то вычислительная процедура (11) определяет релаксационные методы решения исходной задачи. Для непрерывно дифференцируемой функции $Q(x)$ релаксационность метода (11) обеспечивается тогда, когда направление спуска p_k образует острый угол с направлением градиента $\nabla Q(x)$, а длина шага α_k достаточно мала. Из релаксационных методов наиболее часто используются градиентные методы, в основе которых лежит идея последовательного уточнения некоторого начального решения, получаемая за счет движения в направлении минимума функции $Q(x)$.

Как известно из классического дифференциального исчисления, для нахождения экстремума некоторой скалярной функции $Q(x)$ векторного n -мерного аргумента $x = (x_1, \dots, x_n)$ должны быть выполнены необходимые условия $dQ(\cdot)/dx_i = 0$, $i = \overline{1, n}$, которые определяют систему n нелинейных уравнений относительно n неизвестных x_i . Если характер нелинейности допускает линеаризацию в окрестности некоторого значения вектора x^k , то, воспользовавшись способом разложения функции $Q(x)$ в ряд Тейлора, получим

$$Q(x) = Q(x^k) + \left[\frac{dQ(x^k)}{dx^k} \right]^T (x - x^k) + \\ + 1/2 (x - x^k)^T \left[\frac{d^2 Q(x^k)}{(dx^k)^2} \right] (x - x^k) + \dots \quad (12)$$

Применяются следующие градиентные методы безусловной минимизации: одноступенчатые, если в выражении (12) ограничиваются линейными членами разложения, двухступенчатые методы, использующие линейный и нелинейный члены разложения (12), и методы сопряженного градиента, которые объединяют лучшие свойства первых двух. Приведем общую вычислительную схему одноступенчатых градиентных методов:

$$x^{k+1} = x^k - \alpha_k \nabla Q(x^k). \quad (13)$$

Здесь $\nabla Q(\cdot)$ — градиент функции $Q(x)$ в точке x^k ; α_k — положительное число или функция, которые выбираем из условия обеспечения сходимости, скорости сходимости и т. п.

В двухступенчатых градиентных методах используем матрицу вторых частных производных функции $Q(x)$. Итерационный процесс в этом случае описывается соотношением

$$x^{k+1} = x^k - [\nabla^2 Q(x^k)]^{-1} \nabla Q(x^k), \quad (14)$$

где $[\nabla^2 Q(x^k)]^{-1}$ — обратная матрица матрицы $\nabla^2 Q(x)$ в точке x^k .

Одноступенчатый градиентный метод прост в вычислительном отношении, но дает медленную сходимость в окрестности точки экстремума. Двухступенчатый метод дает быструю сходимость в окрестности точки экстремума, однако в случае большой размерности вектора x возникают серьезные трудности в вычислении и обращении матрицы $\nabla^2 Q(x)$. При этом необходимо также решать задачу о выборе начального приближения для обеспечения хорошей сходимости в окрестности экстремальной точки.

Метод сопряженных градиентов, объединяя лучшие качества первых двух методов при одновременном устранении их недостатков, на начальных итерациях ведет себя как одноступенчатый градиентный метод, однако к концу вычислительной процедуры его поведение становится похожим на поведение двухступенчатого метода. Основная идея метода сопряженных градиентов основывается на предположении близости $Q(x)$ к квадратичной

функции и состоит в формировании последовательности рекуррентно вычисляемых векторов (направлений спуска) $p_1, \dots, p_n$, ортогональных к $\nabla^2 Q(x)$, так что $(p_k)^T \nabla^2 Q(x^k) (p_j) = 0$, $0 \leq j < k$. Затем производим поиск в сопряженных направлениях, определяемых каждым из векторов p_k в целях выбора оптимальной величины шага. Алгоритм сопряженных градиентов можно представить соотношением $x^{k+1} = x^k - \alpha_k p_k$, где α_k — скалярный множитель, определяющий величину шага в направлении p_k из условия $Q(x^k - \alpha_k p_k) = \min_{\alpha > 0} Q(x^k - \alpha p_k)$; p_k — направление поиска,

определяемое соотношениями $p_0 = \nabla Q(x^0)$; $p_k = \nabla Q(x^k) + \beta_k p_{k-1}$. В зависимости от способа вычисления весового коэффициента при параметрической идентификации технологических процессов применяются следующие конструкции метода сопряженных градиентов [1]: алгоритм Флетчера — Ривза

$$\beta_k = \frac{\|\nabla Q(x^k)\|^2}{\|\nabla Q(x^{k-1})\|^2};$$

алгоритм Поляка

$$\beta_k = \frac{(\nabla Q(x^k) - \nabla Q(x^{k-1}), \nabla Q(x^k))}{\|\nabla Q(x^{k-1})\|^2};$$

алгоритм Мелешко

$$\beta_k = \frac{(\nabla Q(x^k) - \nabla Q(x^{k-1}), \nabla Q(x^k))}{(p'_{k-1}, \nabla Q(x^{k-1}))};$$

$$p_{k-1} = p_{k-1} - \frac{(p_{k-1}, \nabla Q(x^k))}{\|\nabla Q(x^k)\|^2} \nabla Q(x^k).$$

Для суждения об окончании поиска решения можно воспользоваться сравнительной оценкой достигнутых значений $|x^k - x^{k-1}| < \delta$, где δ — некоторое наперед заданное число.

При параметрической идентификации необходимо решать систему нормальных уравнений $Ax = b$ относительно неизвестных x . Использование алгоритма оценивания с обращением матрицы коэффициентов $x = A^{-1}b$ в системе высокого порядка приводит к сложной вычислительной процедуре, при плохой обусловленности матрицы A получить решение практически невозможно. В этом случае следует применить процедуру безусловной минимизации неотрицательной функции штрафа вида

$$Q(x) = 1/2 \delta^T P \delta = 1/2 (Ax - b)^T P (Ax - b), \quad (15)$$

где P — положительно полуопределенная матрица весовых коэффициентов, равная нулю только при $x = A^{-1}b$. Таким образом, в результате минимизации функционала (15) можно получить решение системы $Ax = b$. Вычислительная схема одноступенчатого градиента алгоритма (13) приобретает вид $x^{k+1} = x^k - \alpha_k A^T P (Ax^k - b)$. Вычислительная схема двухступенчатого градиентного алгоритма (14) для рассматриваемой задачи

$$x^{k+1} = x^k - [A^T P A]^{-1} A^T P (Ax^k - b) = A^{-1}b, \quad (16)$$

где

$$\nabla Q(x^k) = A^T P(Ax^k - b); \quad \nabla^2 Q(x^k) = A^T P A.$$

Вычислительная процедура сходится за один шаг независимо от выбора начального приближения x^k . Эта особенность присуща всем линейным задачам. Применение градиентных методов преследует цель избежать транспонирования исходной матрицы системы A , однако, как следует из выражения (16), достичь этого не удалось. Тем не менее градиентные методы представляют собой мощный математический аппарат для параметрической идентификации, особенно в ее первоначальной форме при использовании нелинейных уравнений наблюдения — системы условных уравнений или системы уравнений правдоподобия.

Алгоритмы стохастической аппроксимации [4]. Гибкость и универсальность этого класса алгоритмов заключается в приемлемости их для широкого класса задач, связанных с идентификацией, оптимизацией, адаптацией и обучением при наличии помех. Свою популярность стохастическая аппроксимация получила в силу непараметричности, т. е. возможности статистического оценивания параметров при весьма скудной информации об управляемом объекте, и рекуррентности, т. е. возможности получения новой оценки по новому наблюдению и предыдущей оценке.

Первоначально метод стохастической аппроксимации разработан Роббинсом и Монро для нахождения корня уравнения

$$H(x) = \lambda \quad (17)$$

и обобщен Кифером и Вольфовицем на отыскание экстремума унимодальной функции регрессии

$$H(x) = E\{h(x, \omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} zg(x, z)dz, \quad (18)$$

где $h(x, \omega)$ — случайная величина, зависящая от детерминированного x и случайного ω параметров; $g(x, z)$ — плотность вероятности, соответствующая функции распределения $G(x, z) = P\{h(x, \omega) < z\}$; p — вероятность события; ω — воздействие окружающей среды.

Основная идея метода состоит в том, чтобы при решении уравнения (17) или поиске экстремума функции регрессии (18) в качестве направления поиска выбрать направление, определяемое не поведением самой функции $H(x)$, значения которой обычно неизвестны, а характером изменения случайной величины $h(x, \omega)$. Интерес представляет построение таких процессов стохастической аппроксимации, которые дают итерационную процедуру поиска решения уравнения регрессии в случае, когда распределение вероятностей изучаемой случайной величины неизвестно, но имеется набор реализаций случайной величины. В этом случае стохастическую аппроксимацию можно применить

для уточнения средних характеристик модели, в процессе накопления информации о действии случайных факторов, поскольку функция регрессии представляет среднее значение некоторой случайной величины $E\{h(x, \omega)\}$.

Алгоритм Роббинса — Монро является статистическим аналогом одношагового градиентного метода (13), определяемого соотношением

$$x^{k+1} = x^k - \alpha_k \nabla H(x^k). \quad (19)$$

Если измерения $H(x)$ засорены помехами ω с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией, т. е. $z = H(x) + \omega$, то считают, что $H(x)$ представляет собой функцию регрессии z на x , определяемую соотношением (19). В этом случае $H(x)$ ненаблюдаема и вместо выражения (19) для нахождения единственного решения $x^* = \theta$ уравнения (18) следует воспользоваться стохастическим алгоритмом вида

$$x^{k+1} = x^k - \alpha_k (h^k - \lambda), \quad (20)$$

где $\nabla H(x^k, \omega) = 1/2 d(h^k - \lambda)^2/dh^k = (h^k - \lambda)$ — градиент функции штрафа; h^k — измеренное значение функции $H(x)$ в точке x^k , засоренное помехой ω ; α_k — последовательность вещественных чисел, обеспечивающая сходимость по вероятности x^k к корню уравнения $x^k = \theta$.

Для обеспечения процедуры сходимости процесса (20) скаляр α_k должен удовлетворять условиям

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \alpha_k = 0; \quad \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k = \infty; \quad \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha_k)^2 < \infty.$$

Этим условиям удовлетворяют многие последовательности и в том числе

$$\alpha_k = \frac{L}{D(x) + k}, \quad \alpha_k = \frac{L}{m + k}, \quad \alpha_k = \frac{L}{k^\omega},$$

где $D(x)$ — дисперсия x ; $m = \text{const}$; $L > 0$; $0,5 < \omega \leq 1$.

При параметрической идентификации технологического процесса, описываемого регрессионной моделью $y = \sum_{j=1}^m a_j x_j$, алгоритм стохастической аппроксимации (19) принимает вид

$$a^{k+1} = a^k - \alpha_k \left[h^k(x, \omega) - \sum_{j=1}^m a_j x_j \right] x_j, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{где } H(x^k, \omega) &= 1/2 \left[h^k(x, \omega) - \sum_{j=1}^m a_j x_j \right]^2; \quad \nabla H(x^k, \omega) = \\ &= \left[h^k(x, \omega) - \sum_{j=1}^m a_j x_j \right] x_j. \end{aligned}$$

Следовательно, при параметрической идентификации объектов управления в режиме нормального функционирования вычислительная процедура оценивания часто является слабо сходящейся. Это объясняется плохой обусловленностью матрицы статистических наблюдений или системы нормальных уравнений Гаусса. Для оценки степени обусловленности системы в работе использованы числа обусловленности по Тодду, более эффективные по сравнению с другими подобными количественными показателями.

Определение чисел обусловленности связано с решением полной или частичной проблемы собственных значений. В первом случае определяются все, во втором — некоторые корни характеристического полинома. Проблему собственных значений решаем в два этапа: сначала разрываем характеристический определитель и находим коэффициенты характеристического полинома, затем — собственные значения. При построении характеристического полинома использован метод Бохера, который не чувствителен к вырождению определителей и плохой обусловленности.

Для вычисления корней характеристического уравнения при решении частичной проблемы собственных значений использованы инженерные и вычислительные методы, которые позволяют быстро оценить порядок числа обусловленности по Тодду. Более точно корни определяем методом Ньютона, если задана априорная информация о расположении корней и порядок полинома ниже 20, и методом Мюллера, который предполагает замену $P_n(\lambda)$ некоторой квадратичной функцией с последующим уточнением корней по трехточечной схеме интерполяции.

Метод и алгоритм параметрической идентификации выбираем в зависимости от величины числа обусловленности. При малых значениях этого числа (хорошо обусловленная система) применимы любые методы оценивания. В случае больших значений $\rho(A)$ целесообразно использовать алгоритмы, нечувствительные к плохой обусловленности: метод стохастической аппроксимации и релаксационные алгоритмы безусловной минимизации. Универсальный характер релаксационных алгоритмов позволяет применять их при линейном и нелинейном оценивании, анализе и синтезе оптимального управления технологическими процессами.

Список литературы: 1. Авраменко В. П., Никитюк А. В. Релаксационные алгоритмы безусловной минимизации. Киев, РФАП АН УССР, 1976. 9 с. 2. Деруссо П., Рой Р., Клоуз И. Пространство состояний в теории управления. Пер. с англ. М., «Наука», 1970. 620 с. 3. Сборник научных программ на фортране. Вып. 2. Матричная алгебра и линейная алгебра. Пер. с англ. М., «Статистика», 1974. 224 с. 4. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Д. Идентификация систем управления. Пер. с англ. М., «Наука», 1974. 248 с. 5. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. Киев, «Техника», 1975. 768 с. 6. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.—Л., Физматгиз, 1963. 736 с.

УДК 330.115

Л. А. КИРЕНКО, канд. экон. наук, Ю. В. ШАГАЕВ
Харьковский институт радиоэлектроники

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА АНАЛИЗА ДОКУМЕНТООБОРОТА С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Автоматизированная система управления может быть разработана на основании тщательного изучения всех функций существующей системы и технологии управления, т. е. всех методов и средств, реализующих данные функции. Поэтому разработке

проекта и внедрению автоматизированной системы управления предшествует длительное и тщательное изучение объектов автоматизации. Один из объектов исследования — экономическая информация, характеризующая всю производственно-хозяйственную деятельность предприятия в числовом виде через систему натуральных, стоимостных и других показателей, выступающая в документированном или каком-либо другом виде.

Документы, отражающие производственно-хозяйственную деятельность предприятия, весьма разнообразны. Формирование документа представляет собой набор исходных показателей и последовательность записи их в форме документа.

Первичные документы строятся на основе определенного множества исходных показателей, возникающих в процессе деятельности предприятия и характеризующих совершаемые им хозяйственные операции. Первичные показатели перерабатываются в результатные показатели, которые используются для воздействия на процесс производства для создания нормальных условий его функционирования. Переработка документов, их составление, заполнение, оформление, пересылка, считывание представляет собой технологический процесс обработки экономической информации, так как они предусматривают выполнение строго регламентированных операций в строго определенной последовательности. Под операцией понимается работа, совершаемая над одним показателем в целях преобразования первичной информации. Технологический процесс обработки информации — сложный комплекс взаимосвязанных операций, который в условиях существующей системы документооборота усложнен многочисленными переписками и дублированием информации.

Набор документов и процессы их формирования, а также расчет показателей в определенной степени отражают существующую систему планирования и управления. Однако эти сведения не дают представления о характере работ каждого подразделения управляющей системы. Поэтому необходимо изучение маршрутов движения документации, которые отражают последовательность ее прохождения по подразделениям от момента формирования до сдачи на хранение или до передачи за пределы предприятия.

Для изучения систем управления на предприятиях и в организациях, упорядочения потоков информации применяются математические модели. Модели являются универсальным и наиболее совершенным выражением современных экономико-математических методов. Модель определяется как приближенное представление действия конкретной исследуемой системы, составляемое для понимания ее действий и предсказания поведения в заданных условиях. При разработке моделей необходимо как можно более полно отразить диалектическое единство всех составляющих исследуемой проблемы в их влияние на экономический аспект. Модель может как отражать всю систему, так и описывать ее отдельные элементы. Частные модели обладают определенной

автономностью и предназначены для изучения отдельных элементов и соотношений внутри подсистем. Пример частной модели — модель для изучения информационных связей и информационных потоков в системе управления. Модели можно использовать для изучения качественных и количественных сторон системы.

Для изучения организации планирования и управления, а также движения и обработки информации применяются модели в виде сетевых графиков, стрелочных диаграмм, графов, таблиц, матриц. Матричная информационная модель наиболее наглядно представляет процессы образования, маршруты движения показателей и документов. В них в единообразной форме показаны все данные о деятельности каждого подразделения, а также данные, характеризующие деятельность всей обследуемой системы в целом. Однако это и наиболее трудоемкий метод моделирования, так как отражение процесса формирования документов и показателей производится вручную. Вручную затем подсчитываются сведения, позволяющие определить, на основании каких документов (реквизитов) формируются другие документы (реквизиты), сколько раз и для создания каких документов (реквизитов) используются показатели, взятые из документов этого подразделения, какие документы (реквизиты), разработанные данным подразделением для других подразделений и для внешних организаций, а также документы, поступающие из других подразделений или внешних организаций. Это довольно полная «информация об информации», но для проведения такого исследования и анализа необходимо 8—10 месяцев при наличии квалифицированного коллектива специалистов из 8—10 человек.

В последнее время возникают проблемы, для решения которых классические математические модели оказались недостаточными. К числу таких проблем относятся вопросы, связанные с автоматизацией управления производством. В таких случаях применяется «имитационное моделирование» — новое направление в математическом моделировании, которое предполагает составление алгоритма функционирования объекта и реализацию его в виде программы на ЭВМ.

Разработанный алгоритм обработки экономической информации на ЭВМ наряду со всеми достоинствами моделей, применяемых в области исследования экономической информации (четкость, последовательность, наглядность) имеет и несравненные преимущества (быстрота получения заданных параметров и удобство использования результатов анализа).

В целях использования предлагаемого алгоритма на основании материалов обследования составляют схему документооборота по каждому из подразделений и по всей системе в целом. Все подразделения инструментальной подготовки производства, документы, реквизиты, периодичность использования реквизитов, их значимость, вид переработки информации шифруют по следующей структуре:

XX	XX	XXX	XXX	X	X	XX	XX	Вид переработки
							1	
								Значность
								Периодичность
								Нормативно-справочная или нет
								Шифр реквизита
								Шифр документа
								Шифр подразделения, где формируется документ
								Шифр ИПП

При обследовании задач, решаемых в каждом из подразделений, определяем состав реквизитов и информационную взаимосвязь между ними, что отражаем в схеме документооборота. Все документы нумеруем по порядку независимо от подразделения, где они формируются или обрабатываются, и независимо от номера формы, присвоенной им. Этот трехзначный номер и будет шифром документа, который используется исключительно для анализа информационных потоков и не отражается на работе с документами при общепринятых на предприятии обозначениях форм документов.

Для выявления промежуточных реквизитов, т. е. реквизитов, которые не содержат новой информации по сравнению с исходными данными, для выявления всей входной информации для данного подразделения, выходной все виды переработки информации и процессы формирования зашифрованы (рисунок): 00 — создание реквизита; 01 — учет информации; 02 — дублирование информации; 03 — хранение информации; 04 — расчетная информация; 05 — сверка информации; 06 — отчетная информация; 07 — прохождение информации через подразделение без изменений. При этом «0» перед шифром вида информации обозначает, что информация входная, «1» — выходная.

По любому из перечисленных признаков можно произвести выборку информации. Причем, зная значность и периодичность заданных реквизитов, несложно подсчитать трудоемкость обрабатываемой информации, а также объем информации при создании нормативно-справочной и оперативной информации.

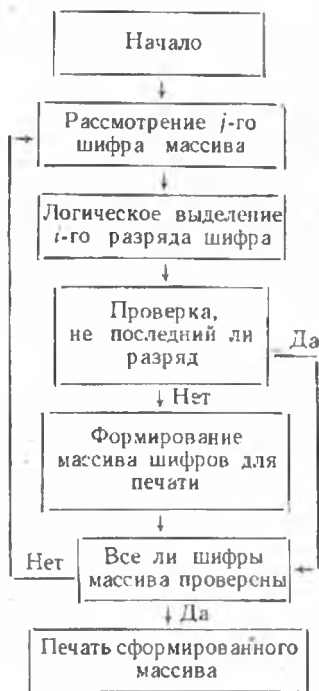
Чтобы выбрать интересующую информацию по заданному шифру, необходимо заполнить поле «шифр семерками» по количеству разрядов шифра, расположив их строками в зависимости от структуры шифра. Так, структура шифра для обработки экономической информации при инструментальной подготовке производства выглядит следующим образом: 77 — шифр ИПП, 77 — шифр подразделения, 777 — шифр документа, 777 — шифр реквизита, 7 — нормативно-справочная или нет, 7 — периодичность, 7 — значность, 77 — вид переработки или процесс формирования информации.

«Семерки» проставляются с целью, чтобы при логическом умножении интересующего признака на «77...» сразу получить численное значение данного признака. Так, если это шифр документа при умножении его на «777» получим один из конкретных документов: 001 — чертеж, 002 — карта технологического процесса, 003 — годовая программа выпуска инструмента, 004 — карта учета движения инструмента и т. д. Чтобы определить, по какому из признаков необходимо произвести выборку информации, следует рядом с «7...», определяющими этот признак, поставить «1». Например, если необходимо выбрать всю нормативно-справочную информацию в разрезе подразделений, исходная информация выглядит следующим образом: 77 771 777 777 71 7 77 77.

При необходимости получения той же информации по одному из подразделений шифр конкретного подразделения указываем в исходной информации: 77 05 777 71 7 77 77, где «05» — бюро эксплуатации ИО.

Таким же образом программа работает и с другими разрядами шифра: при указании конкретного шифра выбирается информация только по данному шифру, при указании «1» рядом с семерками, определяющими признак, выбирается информация по всему признаку шифров.

Использование данного алгоритма сокращает период исследования и анализа информационных потоков в несколько раз. Разработанный алгоритм можно использовать в любой подсистеме и в любом подразделении с любой структурой шифра и любой разрядностью. С его помощью можно выбрать однородную и раз-



Блок-схема алгоритма программы «Выбор»

нородную информации с любым количеством определяющих признаков. Кроме того, этот алгоритм используют для выбора любых элементов любого шифра.

Детальное исследование информационных потоков о состоянии производственной системы дает возможность:

1) минимизировать объем информационных потоков путем использования способа однократной записи исходных данных (создание массивов условно-постоянной информации), создать документы многоцелевого назначения и многократного использования;

2) рационально распределять информацию по различным ступеням управления;

3) комплексно механизировать и автоматизировать управленческие работы;

4) обеспечить службы информацией для составления планов с учетом реальных условий производства;

5) оптимизировать составляемые планы с учетом выбранных критериев [3].

Упорядочение информации по составу и назначению, очевидно, повлечет за собой изменение состава документов, изменение реквизитов по функциональной принадлежности, создание массивов условно-постоянной информации.

Список литературы: 1. Проектирование машинной обработки экономической информации. М., «Статистика», 1975. 137 с. 2. Экономико-математические методы и модели планирования управления. Под ред. В. Г. Шорина. М., «Знание», 1973. 137 с. 3. *Либерман В. Б., Шнайдерман И. Б.* Информационные основы автоматизации управления производством. М., «Статистика», 1973. 11 с.

УДК 681.3.06

Г. А. ЯЦЕНКО

Харьковский институт радиоэлектроники

АЛГОРИТМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛНОСКОБОЧНОЙ ФОРМЫ ЗАПИСИ В БЕССКОБОЧНЫЕ

В интересах программирования, разработки трансляторов, а также построения внутреннего языка и синтеза ЭВМ могут быть использованы бесскобочные формы записи математических операторов, т. е. префиксная и постфиксная нотации [1]. Наряду с бесскобочными широко применяется полноскобочная форма записи.

В работе А. Т. Берзтисса*, исходя из инфиксной формы, показан алгоритм формирования стека с постфиксной нотацией. Существует алгоритм преобразования математических операторов,

* Берзтисс А. Т. Структуры данных. М., «Статистика», 1974. 408 с.

без логических операций, из инфиксной в полноскобочную форму записи. Целесообразно разработать методику перевода полноскобочной формы записи математических операторов в бесскобочные.

Предлагаются алгоритмы преобразования полноскобочной формы записи математических операторов в префиксную и постфиксную нотации.

Введем следующие обозначения: $I \approx \{i/i — \text{натуральные числа}\} —$ индексное множество; $B \approx \{b_i/b_1 = +, -, b_2 = \times, /, \div, b_3 = = \uparrow\} —$ множество символов арифметических операций; $A \approx \approx \{a_i/i \in I\} —$ множество операндов; $D \approx \{d_i/d_1 = (, d_2 =)\} —$ множество символов скобок; Z -строка — математический оператор, который образован из элементов множеств A, B, D , записанных в полноскобочной форме; Y -строка — математический оператор в префиксной или постфиксной форме записи; $E \approx \{e_i/i \in I\} = AUBUD$; $P \approx \{p_i/p_1 = A, p_2 = B, p_3 = D\}$; $G(j) — j$ -кортеж над $\{d_2\}$, $i \in I$; $G(j)$ неделим, т. е. не может рассматриваться как сцепление кортежей над $\{d_2\}$; $F(j) \approx \{d_1/d_1, — j\text{-я } d_1, \text{ отсчитанная влево от } G(j), j \in I$; $H —$ первый слева в Z -строке кортеж над $\{d_1\}$; $Q_i — i$ -й кортеж над E ; если $Q = Q_i Q_j —$ сцепление кортежей Q_i, Q_j над E , то $Q_i \in Q$ и $Q_j \in Q$; если $Q = e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{i(k-1)}, e_{ik}$, то $Q^{-1} = e_{ik}, e_{i(k-1)}, \dots, e_{i2}, e_{i1}$; $Q[p_i] —$ кортеж, полученный в результате удаления из Q всех элементов множества p_i ; $\bar{T} —$ перемещение объектива на один символ вправо; $[T] —$ операция удаления из Z -строки символа, наблюдаемого читающей головкой; квантор: $\forall(k): —$ «для всех k ».

Алгоритм преобразования Z-строки в префиксную Y-строку. Алгоритм представлен в виде двухленточной машины Тьюринга с одной читающей и стирающей головкой и одной записывающей. На первой ленте записана Z -строка, на второй — формируется префиксная Y -строка. Читающая головка с полем зрения T в один символ Z -строки движется вдоль первой ленты, записывающая головка — вдоль второй.

Служебные переменные w, g учитывают раскрываемые в процессе преобразования скобки Z -строки. Начальные значения $w = g = 0$.

В зависимости от символа, просматриваемого читающей головкой, значения служебных переменных в префиксную Y -строку последовательно слева направо записывается либо пустой символ $\emptyset$, либо символ T , просматриваемый объективом, и выполняются соответствующие служебные действия, определяемые правилами управления головками, которые представлены в форме нормального алгоритма. Служебные действия заключены в угловые скобки $< >$. Условия antecedента, которые должны выполняться одновременно, соединены знаком конъюнкции.

Правила управления головками машины Тьюринга: 1. $(w = g = 0) \wedge (T = d_1 \rightarrow \emptyset < w := 1, [T], \bar{T} >$; 2. $(w = g = 0) \wedge (T \in A) \rightarrow T < [T], \bar{T} >$; 3. $(w = g = 0) \wedge (T \in B) \rightarrow \emptyset < [T] \bar{T} >$;

$$(((+(/((a+c)\uparrow b)))-(e\times a))-b);$$

$$abcd-\times;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$(((+(/(\uparrow)\uparrow b)))-(e\times a))-b);$$

$$abcd-\times ac;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$(((+(/(\uparrow b)))-(e\times a))-b);$$

$$abcd-\times ac\uparrow;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$((+/\uparrow))-(e\times a))-b);$$

$$abcd-\times ac\uparrow b;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$((-(e\times a))-b);$$

$$abcd-\times ac\uparrow b\uparrow /+;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$(-\times)))-b);$$

$$abcd-\times ac\uparrow b\uparrow /+ea;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$(-b);$$

$$abcd-\times ac\uparrow b\uparrow /+ea\times-;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$-);$$

$$abcd-\times ac\uparrow b\uparrow /+ea\times-b;$$

$$\begin{array}{c} \overbrace{\hspace{1.5cm}}^S \\ \overbrace{\hspace{1.5cm}}^R \end{array}$$

$$\emptyset;$$

$$abcd-\times ac\uparrow b\uparrow /+ea\times-b-.$$

В результате формируется постфиксная Y-строка $abcd-\times ac\uparrow b\uparrow /+ea\times-b-$. Итак, разработанные формальные алгоритмы преобразования форм записи математических операторов могут быть успешно реализованы с помощью ЭВМ. Последовательное формирование Y-строк позволяет при необходимости выводить на печать математический оператор в бесскобочной форме записи в процессе его преобразования.

Данные алгоритмы дают возможность преобразовывать из полноскобочной в бесскобочные формы записи математические операторы элементарных и позициональных функций.

УДК 681.321.11

И. В. КОРЫТЦЕВ, Е. Г. ПРОШКИН, канд. техн. наук,
Ю. Н. УЛЬЯНОВ

Харьковский институт радиоэлектроники

УСТРОЙСТВО СОПРЯЖЕНИЯ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА С ПЕРФОРАТОРОМ

Обработка результатов экспериментов с помощью методов математической статистики требует наличия больших массивов информации, источниками которой часто являются цифровые изме-

рительные приборы, имеющие выход на цифропечать. В этом случае подготовка исходных данных для ввода в ЭВМ является трудоемким и длительным процессом, так как необходим дополнительный ручной перенос информации по данным цифропечати на перфоленту либо перфокарты. При переносе цифровой информации на перфоноситель возможны ошибки оператора, требующие последующей корректировки цифрового материала.

Предлагается конструкция устройства сопряжения цифрового измерительного прибора (ЦИ) с перфоратором. Устройство позволяет осуществить вывод на перфоленту семиразрядных чисел,

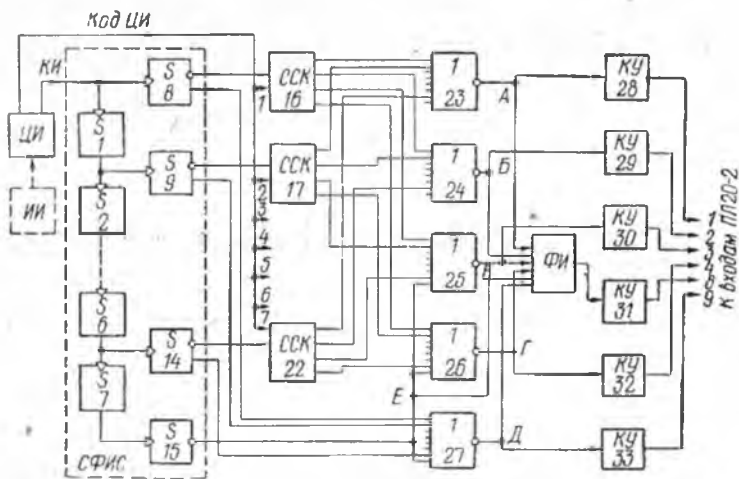


Рис. 1. Структурная схема устройства сопряжения.

представляемых ЦИ в виде параллельного двоично-десятичного кода 8—4—2—1. Оно предназначено для работы в перфораторе типа ПЛ20-2, имеющим старт-стопное движение перфоленты. При этом скорость перфорации определяется быстродействием перфоратора и составляет 20 строк/с.

Структурная схема устройства сопряжения показана на рис. 1. Основные ее элементы — схема считывания кода (ССК) и схема формирования импульсов считывания (СФИС). Первая осуществляет считывание кода одного разряда и выдает информацию в параллельном двоичном коде через схемы ИЛИ и ключевые усилители (КУ) на входы перфоратора. Данная схема представляет собой четыре схемы 2И-НЕ, имеющие один общий вход, на который поступает импульс считывания, вырабатываемый СФИС. Схема считывания кода и схемы ИЛИ выполнены на микросхемах серии К133 типа К1ЛБ333 и К1ЛБ332. Схема формирования импульсов считывания, выполненная на микросхемах типа К2ГФ182, формирует последовательность импульсов длительностью 15 мс и периодом следования 50 мс. Эти параметры обусловлены тре-

бованиями ко входным сигналам перфоратора и его быстродействием. Количество импульсов в последовательности определяется числом разрядов ЦИ, выводимых на перфоленту, и необходимостью перфорации отметки разграничителя чисел. Описываемое устройство предназначено для вывода на перфоленту семиразрядных чисел и отметки разграничителя, поэтому СФИС формирует восемь импульсов, период следования которых задается последовательно включенными одновибраторами 1—7, а длительность — одновибраторами 8—15.

Устройство сопряжения работает следующим образом. После окончания измерения ЦИ выдает отрицательный импульс «конец измерения» (КИ) на СФИС, одновибратор которой 8 вырабатывает импульс считывания, подаваемый на ССК 16. При этом код первого (старшего) разряда ЦИ проходит через ССК 16 и схемы ИЛИ 23—26 на КУ 28—30, 32. С другого выхода одновибратора 8 снимается импульс считывания низкого потенциала, подаваемый на схему ИЛИ 27 и далее на КУ 33. Ключевые усилители 28—33 выполнены на транзисторах типа МП42, имеют открытый выход и формируют импульсы перфорации отрицательной полярности с амплитудой 10 В. При этом КУ 33 формирует импульс перфорации транспортного отверстия, КУ 31 — импульс перфорации дополнения комбинации кода до нечетного количества единиц. Цикл перфорации повторяется с приходом второго импульса считывания, вырабатываемого одновибратором 9, через период перфорации, задаваемый положительным импульсом высокого потенциала одновибратора 1. В этом случае происходит перфорация следующего, второго разряда числа. Элементы, служащие для формирования импульсов считывания — одновибраторы 3—5, 10—13, а также ССК 18—21, предназначенные для считывания кодов промежуточных разрядов числа. На структурной схеме устройства сопряжения для упрощения не показаны. После окончания перфорации седьмого разряда СФИС выдает импульс низкого положительного потенциала, снимаемый с одновибратора 15 и служащий для перфорации отметки разграничителя чисел (код 10001100 для ЭВМ «Минск-32»).

Чтобы общее число единиц в каждой комбинации кода разряда было нечетным, используется формирователь импульсов (ФИ), принципиальная схема которого показана на рис. 2. Данный ФИ выполнен по логической структуре схем запрета и выдает положительный импульс на КУ 31 только в моменты прихода четных комбинаций кода либо прихода комбинации, соответствующей нулю.

Входные элементы устройства сопряжения выполнены на интегральных схемах, поэтому величины уровней напряжений цифровой информации, поступающей от ЦИ, должны находиться в пределах для «1» — от +1 до +3 В; «0» — от 0 до +0,3 В. Это условие для большинства современных цифровых приборов, построенных на интегральных схемах, выполняется.

Применение устройства сопряжения ЦИ с перфатором значительно сократило время подготовки больших массивов цифровой информации для ввода в ЭВМ. За время эксплуатации устройства сбоев при выводе цифровой информации на перфоленту не наблюдалось.

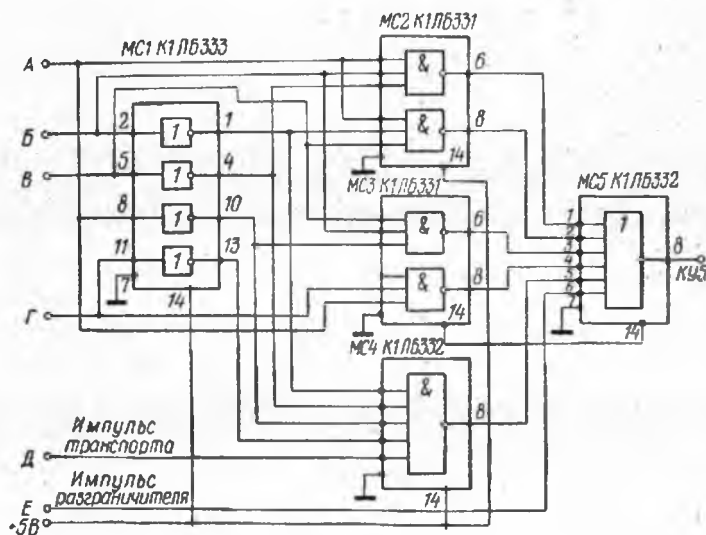


Рис. 2. Принципиальная схема формирователя импульсов.

УДК 65.012.122

А. С. БЕСЕДИН

Харьковский институт метрологии

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проблема прогнозирования технического состояния систем автоматики (СА), решается двумя путями: прогнозирование на основании оценки надежности по числу зафиксированных отказов (статистическое предсказание надежности) и индивидуальное прогнозирование по одной реализации, по одному конкретному элементу или устройству. Возможность исследования надежности конкретных изделий при индивидуальном прогнозировании приобретает особую важность для устройств, выпускаемых в небольшом числе и выполняющих важные функции, где статистические методы предсказания надежности совершенно недопустимы, так как не обеспечивают предупреждений отказа.

В статье разработан рабочий аппарат ускоренного определения надежности с помощью индивидуального аналитического

прогнозирования методом неразрушающих испытаний и решен связанный с этим комплекс вопросов.

Задачу решаем при учете следующих допущений.

1. Рассматривается прогнозирование только постепенных отказов, доля которых в общем числе отказов СА составляет 70—90% [1].

2. Изменения характеристик СА во времени в общем случае — нестационарный случайный процесс.

3. Прогнозирование состояния параметров основывается на переносе событий и состояний, имевших место в недалеком прошлом, на будущее.

Процесс изменения характеристик СА представляется многомерной функцией состояния $F(y_0, y_1, \dots, y_i, t)$, где $y_0, y_1, \dots, y_i$ — выходные параметры. В качестве априорной информации используются данные контроля в течение времени $0-t_k$, где t_k — продолжительность периода контроля (объем выборки). В процессе контроля получены значения функции $F(y_0, y_1, \dots, y_i, t)$ в дискретные моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_k$, т. е. имеются функции $F_0(y_0, y_1, \dots, y_i, t_0)$, $F_1(y_0, y_1, \dots, y_i, t_1)$, ..., $F_k(y_0, y_1, \dots, y_i, t_k)$. В результате прогноза находим значения функции $F(y_0, y_1, \dots, y_i)$ за время $t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_{k+пр}$, где $t_{k+1} - t_{k+пр}$ — время прогнозирования (упреждения).

При такой постановке возможны два варианта решения. В первом случае непосредственно определяем функцию состояния $F(y_0, y_1, \dots, y_i, t)$. Данное решение достаточно сложно и технически труднореализуемо. Более рациональным решением является нахождение функции двух параметров — y и $t_{k+пр}$, а затем уже определение функции состояния $F(y_0, y_1, \dots, y_i, t_{k+пр})$. Второй случай значительно упрощается, если при анализе параметров, от которых зависит работоспособность, удастся найти один определяющий параметр (ОП), характеризующий техническое состояние СА в любой момент времени.

Задача прогнозирования как в первом, так и во втором случае состоит из ряда подзадач, в результате чего ход решения можно представить в виде алгоритма. Схема такого алгоритма для выбранного нами (как более простого) второго случая приведена на рис. 1.

Временные последовательности основных параметров формируются в процессе исследования СА при специально поставленном эксперименте, в процессе заводских испытаний или в условиях нормальной эксплуатации. При анализе полученных характеристик определяется возможность использования всей совокупности или одного параметра в качестве прогнозируемых, для чего используются критерии, приведенные в работе [2]. Если при анализе окажется, что один ОП не удалось найти и работоспособность СА определяется несколькими выходными параметрами (ВП), задача прогнозирования значительно усложняется.

При определении характера процесса временные последовательности необходимо отнести к классу стационарных или нестационарных. Определение проводится в две ступени. Сначала анализируем результаты наблюдений по интервалам группирования L и условным средним арифметическим значениям $Y_{\text{ср}}$ в каждом интервале группирования. Если анализ не дает однозначных результатов, при помощи статистических критериев вычисляем допустимые величины рассеивания средних арифметических. По первому из них (метод Фишера) допустимость рассеивания условных средних арифметических определяем тогда, когда дисперсии интервалов группирования равны между собой, что установлено заранее. Вторым критерий (метод Аббе) обладает меньшей чувствительностью, однако позволяет определить разницу между случайным рассеиванием условных средних и их монотонным изменением.

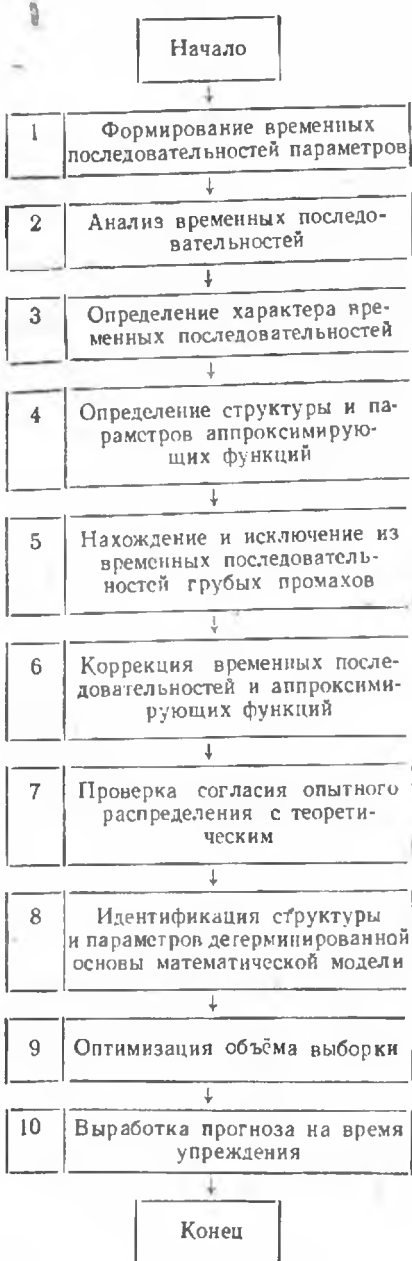


Рис. 1.

Нахождение структуры и параметров аппроксимирующей функции нестационарного процесса основывается на изучении физико-химических процессов, протекающих в СА. Как показал опыт, для СА из большого количества структур наиболее приемлемы полиномиальные функции, причем параметры полинома определяем методом наименьших квадратов (МНК). Степень полинома не рекомендуется брать выше третьей. Если по результатам третьего шага алгоритма временная последовательность отнесена к классу стационарных, необходимость в идентификации структуры и параметров функции отпадает.

На пятом этапе находим и исключаем из временных последовательностей грубые промахи. Причины таких аномальностей — кратковременное резкое изменение условий контроля, питающих напряжений, неправильный отсчет показаний по шкале прибора, кратковременная неисправность измерительной аппаратуры. Если достоверно известно, что резкие отклонения ВП или ОП являются грубыми погрешностями, их исключаем без какого-либо анализа. Когда причину однозначно установить нельзя, применяем статистические критерии обнаружения резко выделяющихся наблюдений и по результатам анализа определяем необходимость исключения этих результатов из массива [3, 4]. Доверительный интервал назначается равным тройному значению среднего квадратического отклонения: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta y_i)^2}{n-1}}$, где Δy_i — отклонения измеренных значений от тренда (для нестационарного процесса) или от среднего значения временной последовательности (для стационарного процесса); n — число измерений периода предыстории.

Коррекция временных последовательностей заключается в отбрасывании из массива результатов измерений, превышающих границы доверительного интервала, после чего уточняются параметры аппроксимирующих функций.

Согласие опытного распределения с теоретическим при измерениях ВП или ОП в одинаковых условиях для исключенного из массива тренда проверяем по критерию Колмогорова, χ^2 или ω^2 [3, 5]. При числе измерений $n > 100$ предпочтение отдается критерию Колмогорова и χ^2 . Критерий ω^2 применяется при количестве измерений более 50 и обязателен при $n < 200$. Последний является более эффективным, чем два предыдущих, но требует выполнения большого объема вычислительных операций на ЦВМ.

При идентификации детерминированной основы математической модели временного ряда ВП или ОП учитывается, что ошибка прогнозирования состоит из трех основных составляющих: неоптимальности выбора детерминированной основы математической модели процесса изменения параметра; изменения параметров модели, произошедших в результате изменения параметров объекта на этапах контроля; ошибки, обусловленной присутствием во временном ряде помех.

Первая составляющая имеет наибольший вес, поэтому одним из наиболее важных аспектов прогнозирования является правильная идентификация детерминированной основы математической модели временного ряда. Как показали проведенные нами исследования, обобщенной моделью изменения характеристик для СА является полином m -й степени вида $Y(t) = \sum_{i=0}^m a_i t^i$. Правильность выбранной модели тренда проверяем вычислением среднего квадратического отклонения σ или дисперсии σ^2 способом

наименьших квадратов (или максимума правдоподобия) для различной степени m экстраполирующего полинома. Коэффициенты a_i вычисляем по реализации временного ряда от 0 до t_k , а СКО определяем с учетом времени упреждения (т. е. время $t_k - t_{k+пр}$).

Объем выборки оптимизируется по ошибке прогноза ВП или ОП. Для этого вычисляем СКО σ в функции количества точек контроля n за время t_k (с учетом выработанного прогноза за время $t_k - t_{k+пр}$). Определенная таким образом функция $\sigma = f(n)$

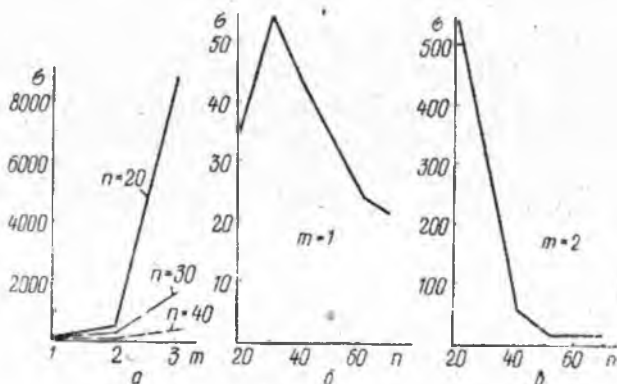


Рис. 2.

позволяет оптимизировать объем выборки при решении компромисса между обеспечением выполнения требований по точности прогнозирования, а следовательно, и увеличением объема выборки, с одной стороны, и уменьшением шага контроля для увеличения времени упреждения, с другой.

По идентифицированному виду аппроксимирующего полинома, оптимальному шагу контроля (объему выборки) и вычисленным для этих условий на ЦВМ значениям коэффициентов полинома a_i на последнем этапе вырабатывается прогноз на время упреждения.

Описанный метод экспериментально проверяли на примере прогнозирования траектории изменения ОП одного из основных функциональных устройств СА — операционного усилителя (ОУ), выбор которого обусловлен его многоцелевым использованием и широким применением в СА. Далее приведена реализация алгоритма прогнозирования по шагам.

1. В результате выполнения операции 1 (см. рис. 1) алгоритма сняты зависимости ВП ОУ в функции времени. Один из таких временных рядов показан на рис. 3 сплошной линией. Время t назначено равным 0,5—0,7 от ресурса работы СА, в котором установлен ОУ, и достигает 100 часов. Количество измерений $n = 82$.

2. Анализ временных последовательностей [2] позволил выбрать в качестве ОП коэффициент усиления K в разомкнутой схеме.

3. Для определения характера временных последовательностей на первом этапе весь массив разбит на восемь интервалов группирования [3]. Условные средние арифметические коэффициента усиления $K_{ус}$ для каждого интервала группирования L приведены ниже.

L	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{ус}$	442,4	429,7	399,7	395,1	391,4	392,9	403,9	386,1

Отсюда видно, что значения $K_{ус}$ по интервалам группирования зависят от неслучайного аргумента t , что позволяет однозначно отнести временную последовательность к классу нестационарных. Применения статистических критериев в данном случае не требуется.

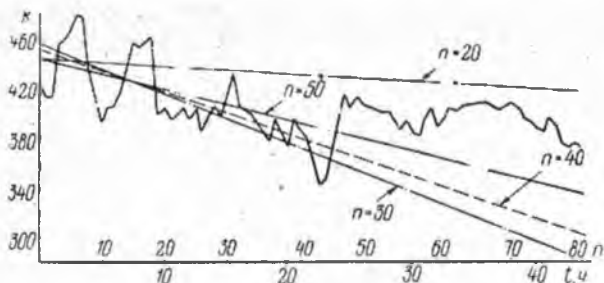


Рис. 3.

4. В качестве аппроксимирующей функции выбран полином вида $K(t) = \sum_{i=0}^m a_i t^i$ при $m=1$. Коэффициенты полинома вычислены на ЦВМ МНК ($a_0 = 433,40$, $a_1 = -1,27$).

5. Временной ряд содержит один грубый промах.

6. Грубый промах исключается из временного ряда, значения a_0 , a_1 уточняются.

7. Проверка согласия опытного распределения с теоретическим выполнена по критерию ω^2 Мизеса — Смирнова после исключения тренда из временного ряда. Получена величина Ω_n^2 , равная 0,513, что соответствует значению функции распределения этой величины $\alpha = 0,25$ [5]. При рекомендованном уровне значимости $\alpha = 0,1 \div 0,2$ выполнено условие $\alpha < (1 - \alpha)$, т. е. гипотеза принимается.

8. Результаты выполнения операции 8 приведены на рис. 2, α , где показана зависимость $\sigma = f(m)$ для объема выборки $n = 20$.

30 и 40 точек. Из рисунка видно, что $\sigma = \sigma_{\text{мин}}$ соответствует $m = 1$, т. е. структуры детерминированной основы математической модели и аппроксимирующей функции совпадают.

9. Для определения оптимального объема выборки на ЦВМ МНК найдена зависимость $\sigma = f(n)$ (рис. 2, б, в) соответственно для $m = 1$ и $m = 2$. Из рисунка видно, что при $n > 50$ погрешность прогнозирования с увеличением длительности учитываемой предыстории уменьшается незначительно, т. е. $n_{\text{опт}} = 50$.

10. Вычисляем для $n = 50$ коэффициенты полинома $a_0 = 442,7$ и $a_1 = -2,39$. Измерения для $n > 50$ используются для контроля качества прогнозирования. Прогнозируемое поведение параметра графически показано на рис. 3 пунктирными линиями. Средняя относительная погрешность прогнозирования составила менее 2%:

$$\delta = \frac{1}{N - n_{\text{опт}}} \sum_{i=n_{\text{опт}}}^N \frac{|K_i - K_{\text{ал}}|}{K_i} \cdot 100\%.$$

Список литературы: 1. Автоматическая проверка оборудования самолетов и ракет. Под ред. В. А. Боднера. М., ИЛ, 1962. 210 с. 2. *Беседин А. С., Петровский Н. И.* О некоторых критериях выбора параметров для прогнозирования надежности сложных автоматических систем. — В кн.: Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Вып. 36. Харьков, 1975, с. 125—129. 3. Методы обработки результатов наблюдений при измерениях. — Тр. метролог. ин-тов СССР (М.—Л.), 1972, вып. 134 (194), с. 50—81. 4. ГОСТ 11.002—73. Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений. М., Стандартгиз, 1973. 24 с. 5. ГОСТ 11.006—74. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. М., Стандартгиз, 1975. 24 с.

УДК 656.259.12

В. П. ГЛУЩЕНКО, канд. техн. наук,
Т. С. ГОРЯИНОВА

Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕАКТИВНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ЭВМ

Наиболее совершенные средства автоматики и телемеханики позволяют значительно увеличить экономическую и техническую эффективность железнодорожного транспорта, обеспечить безопасность и надежность функционирования оборудования и аппаратуры.

На многих дорогах применяются реактивные рельсовые цепи (РРЦ), в которых используется реакция дросселя на систему прямоугольных импульсов, формируемых комбинацией: источник постоянной э.д.с. — маятниковый трансмиттер. Источник и приемник сигналов располагаются на питающем, а дроссель — на

релейном конце рельсовой линии (РЛ). Полезный сигнал распространяется дважды вдоль РЛ [1].

Указанный принцип построения рельсовых цепей (РЦ) обладает рядом преимуществ: простота настройки и обслуживания, эффективность использования оборудования и аппаратуры, надежность, безопасность, сравнительно низкая стоимость строительно-монтажных работ. Однако отсутствие теоретического обоснования явлений, протекающих в рассматриваемых устройствах, и методов расчета затрудняет более полное использование весьма перспективных функциональных возможностей РРЦ.

Для расчета режимов работы РРЦ необходимо располагать зависимостью мгновенных значений электрических величин от параметров электрических цепей и характеристик воздействия. Указанные зависимости устанавливаются исходя из законов электродинамики, на основании которых выводятся дифференциальные уравнения для токов, протекающих через реле и дроссель. При исследовании оказывается целесообразным представить работу РРЦ в виде последовательности рабочих циклов, каждый из которых делим на два этапа: первый — характеризуется временем (t_1) воздействия импульса (источник постоянной э.д.с. включен в цепь дросселя), второй — временем (t_2) паузы (источник отключен, поляризованное реле находится под током прямого направления). Рельсовая линия, представляющая собой линию с распределенными параметрами (в работе рассматривается линия, состоящая из распределенного активного сопротивления и проводимости) вводится в виде схемы замещения с эквивалентными сосредоточенными параметрами.

Введем обозначения: $r, g, R_0, r_{\text{сп}}, r_{\text{ср}}, r_{\text{з}}, R_{\text{д}}, R_{\text{р}}, R_{\text{п}}, R_{\text{и}}$ — соответственно распределенное активное сопротивление и распределенная проводимость РЛ, активное регулируемое сопротивление цепи источника питания, сопротивление соединительных проводов питающего и релейного концов РЦ, внутреннее сопротивление источника питания, дросселя, реле схемы замещения РЛ; $L_{\text{р}}, L_{\text{д}}$ — эквивалентная индуктивность обмотки реле и дросселя; $e, i_0, i_{\text{р}}, i_{\text{и}}, i_{\text{у}}, i_{\text{д}}$ — э.д.с. источника питания, мгновенное значение тока в цепи источника питания, реле, в начале РЦ, тока утечки, в конце РЦ (в дросселе). Электрические величины с индексом ноль — величины для второго этапа рабочего цикла.

Параметры Т-образной эквивалентной схемы замещения РЛ выражаются через распределенные параметры $r, g, [2]$:

$$R_{\text{п}} = \frac{c}{\text{sh } \gamma l} - 1 Z; R_{\text{и}} = \frac{Z}{\text{sh } \gamma l}, \quad (1)$$

где

$$\gamma = \sqrt{rg}, \quad Z = \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (2)$$

(l — длина РЛ).

После ряда преобразований для мгновенных значений токов в цепи реле и дросселя для первых этапов рабочего цикла получены следующие дифференциальные уравнения и начальные условия:

$$d^2 i_p / dt^2 + 2\alpha di_p / dt + \beta^2 i_p = e \gamma_1; \quad (3)$$

$$d^2 i_d / dt^2 + 2\alpha di_d / dt + \beta^2 i_d = e \gamma_2; \quad (4)$$

$$i_p(0) = e(R_{n1} + R_n) + R_1^2 i_p(0) - R_n R_s i_d(0) / L_p R; \quad (5)$$

$$i_d(0) = e R_n - [R_n(R_s + R_{n1}) + R_n R] i_d(0) - R_n R_s i_p(0) / L_d R. \quad (6)$$

По аналогии с (3)–(6) для вторых этапов рабочего цикла

$$d^2 i_{po} / dt^2 + 2\mu di_{po} / dt + \epsilon^2 i_{po} = 0; \quad (7)$$

$$d^2 i_{до} / dt^2 + 2\mu di_{до} / dt + \epsilon^2 i_{до} = 0; \quad (8)$$

$$i_{po}(0) = -i_p(0), \quad i'_{po}(0) = R_n i_d(0) + (R_{n2} + R_n) i_{po}(0) / L_p; \quad (9)$$

$$i_{до}(0) = i_d(0), \quad i'_{до}(0) = -R_n i_p(0) + (R_n + R_n) i_d(0) / L_d. \quad (10)$$

Коэффициенты 2α , β^2 , γ_1 , γ_2 , 2μ , ϵ^2 в дифференциальных уравнениях (3), (4), (7), (8) определяются через параметры электрических цепей:

$$2\alpha = L_d R_1^2 + L_p [R_n R_n + (R_{n1} + R_s)(R_n + R_n)] / L_d L_p R; \quad (11)$$

$$\beta^2 = (R_n + R_n) R_1^2 - (R_p + R_s) R_n^2 / L_d L_p R; \quad (12)$$

$$\gamma_1 = R_n R_{n1} + R_n R_{n1} + R_n R_n / L_d L_p R, \quad \gamma_2 = R_p R_n / L_d L_p R; \quad (13)$$

$$2\mu = L_d (R_n + R_{n2}) + L_p (R_n + R_n) / L_d L_p R; \quad (14)$$

$$\epsilon^2 = R_n R_n + (R_n + R_n) R_{n2} / L_d L_p R. \quad (15)$$

В уравнениях (11)–(15) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} R_0 + r_v &= R_s; \quad R_n + r_{сп} = R_{n1}; \quad R_p + R_n + r_{оп} = R_{n2}; \\ R_n + R_d + r_{сп} &= R_n; \quad R_s + R_{n1} + R_n = R; \\ R_p R_s + (R_{n1} + R_n)(R_p + R_s) &= R_1^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Решением дифференциальных уравнений (3), (4), (7), (8) определяем мгновенные значения токов, протекающих через реле и дроссель [3]. Выражения для остальных электрических величин (токов, напряжений) устанавливаются с помощью простых соотношений, вытекающих из законов Кирхгофа.

Рассматривается возможность получения при помощи ЭВМ «Наири-К» значений для мгновенных токов и напряжений исходя из выражений (3)–(10). Алгоритм решения уравнений (3), (4), (7), (8) состоит из восьми блоков. Назначение каждого из них заключается в следующем: блок 1 — вводятся исходные данные i_1 , i_2 , шаг интегрирования Γ , шаг печати g , параметры РРЦ (R_p , R_d , R_n , R_{n1} , $r_{сп}$, L_p , L_d , e , R_0 , r_v , $r_{сп}$); блок 2 — вычисление коэффициентов дифференциальных уравнений и начальных усло-

вий соответственно по формулам (11)—(15) и (5), (6) при условии, что $i_p(0) = i_d(0) = 0$; блок 3, 4 — решение дифференциальных уравнений для токов, протекающих через реле и дроссель по формулам (3), (4), вычисление мгновенных значений напряжений на реле и дросселе для первого этапа рабочего цикла, вывод полученных значений на печать; блок 5 — вычисление начальных условий для второго этапа рабочего цикла по формулам (9), (10); блок 6, 7 — решение дифференциальных уравнений для токов, протекающих через реле и дроссель по формулам (7), (8), вычисление мгновенных значений напряжений на реле и дросселе для второго этапа рабочего цикла, вывод полученных значений на печать; блок 8 — вычисление начальных условий для первых этапов рабочих циклов по формулам (5), (6) при условии, что $i_p(0) \neq 0$, $i_d(0) \neq 0$, автоматический переход к третьему блоку и повторение вычислений с учетом начальных условий, полученных после первого рабочего цикла.

На основании разработанного алгоритма составлена программа для ЭВМ «Напри-К» на языке АП (рис. 1). При составлении программы использованы следующие символы и обозначения: $P_0 - P_{12}$ — соответственно параметры электрических цепей R_p , R_d , R_n , R_n , r_{cp} , L_p , L_d , e , R_o , r_b , r_{cp} , t_1 , t_2 ; H , G , M , g — шаг интегрирования и шаг печати; b , n , y , a — начальные условия для тока, протекающего в реле и дросселе; u — напряжение на реле и дросселе; $c_1 - c_4$,

ал 3—5—1977 г. «Напри»

$i = 5, g \times i \tau$

$i = 1 \quad z \quad s \quad e \quad 0$

$j = 12 \quad p$

$j = 5 \quad c \quad л$

1. Допустим $i = 11 \quad j = 12 \quad k = 0$

2. Введем $p_i \quad p_j \quad g \quad л_k$

3. Допустим $j = 0$

4. Введем p_j

5. Вставим $j = j + 1$

6. Если $j - 10 \leq 0$ идти к 4

7. Вычислим $n = p_7 (p_3 + p_4 + p_2) / (p_5 (p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2)) \quad a =$

$= p_7 p_2 / (p_6 (p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))$

8. Вычислим $c_1 = (p_6 (p_0 (p_8 + p_9) + (p_3 + p_4 + p_2) (p_0 + p_8 + p_9)) + p_5 ((p_3 + p_1 + p_{10}) p_2 + (p_3 + p_4 + p_8 + p_9) (p_2 + p_1 + p_{10} + p_3))) / (p_5 p_6 \times (p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))$

9. Вычислим $c_2 = ((p_2 + p_1 + p_3 + p_{10}) (p_0 (p_8 + p_9) + (p_3 + p_4 + p_2) \times (p_0 + p_8 + p_9)) - p_2^2 (p_0 + p_8 + p_9)) / (p_5 p_6 (p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))$

10. Вычислим $c_3 = (p_2 (p_3 + p_4) + (p_3 + p_1 + p_{10}) (p_3 + p_4) + (p_3 + p_{10} + p_1) p_2) / (p_5 p_6 (p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))$

11. Вычислим $c_4 = p_0 p_2 / (p_5 p_6 (p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))$

12. Вычислим $l_1 = p_2 (p_6 (1 + (p_0 + p_3 + p_4)/p_2 + p_5 (1 + (p_3 + p_1 + p_{10})/p_2)) / p_5 p_6$ $l_2 = p_2 (p_3 + p_1 + p_{10} + (1 + (p_3 + p_1 + p_{10})/p_2) (p_0 + p_3 + p_4)) / p_5 p_6$
13. Печатаем с 3 знаками $c_1 c_2$
14. Печатаем с 3 знаками $c_3 c_4$
15. Печатаем с 3 знаками $l_1 l_2$
16. Допустим $b = 0$ $y = 0$
17. Печатаем с 3 знаками b n
18. Идти к 20
19. Вычислим $z_0 = y_1 z_1 = -c_1 y_1 - c_2 y_0 + c_3 p_7$
20. Допустим $t = 0$ $y_0 = b$ $y_1 = n$ $m = g$ $n = g$ $l_3 = b$
21. Программа $gy(y \ 2 \ z \ t \ m \ n \ 0, 1)$
22. Допустим $i = 0$ $j = 1$
23. Вычислим $u = y_i p_0 + y_i p_5$ $b = -y_i$ $m = m + g$
24. Печатаем с 3 знаками $t \ y_i$
25. Печатаем с 3 знаками u
26. Если $m - p_{11} < 0$ идти к 21
27. Печатаем с 3 знаками $y \ a$
28. Идти к 30
29. Вычислим $s_0 = x_1$ $s_1 = -c_1 x_1 - c_2 x_0 + c_4 p_7$
30. Допустим $t = 0$ $x_0 = y$ $x_1 = a$ $m = g$ $n = g$
31. Программа $gy(x \ 2 \ s \ t \ m \ n \ 0, 1)$
32. Допустим $i = 0$ $j = 1$
33. Вычислим $u = x_i p_1 + x_i p_6$
34. Вычислим $y = x_i$ $m = m + g$
35. Печатаем с 3 знаками $t \ x_i$
36. Печатаем с 3 знаками a
37. Если $m - p_{11} < 0$ идти к 31
38. Вычислим $n = (p_2 y - (p_0 + p_3 + p_4 + p_2)/b) / p_5$ $a = (p_2 b - (p_3 + p_1 + p_{10} + p_2) y) / p_6$
39. Печатаем с 3 знаками $b \ n$
40. Идти к 42
41. Вычислим $e_0 = l_1$ $e_1 = -l_1 l_1 - l_2 l_0$
42. Допустим $t = 0$ $l_0 = b$ $l_1 = n$ $m = g$ $n = 2$
43. Программа $gy(l \ 2 \ e \ t \ m \ n \ 0, 1)$
44. Допустим $i = 0$ $j = 1$
45. Вычислим $u = p_0 l_i + p_5 l_i$ $b = -l_i$ $m = m + g$
46. Печатаем с 3 знаками $t \ l_i$
47. Печатаем с 3 знаками u
48. Если $m - p_{12} < 0$ идти к 43
49. Печатаем с 3 знаками $y \ a$
50. Идти к 52
51. Вычислим $0_0 = m_1$ $0_1 = -l_1 m_1 - l_2 m_0$
52. Допустим $t = 0$ $m_0 = y$ $m_1 = a$ $m = g$ $n = 2$
53. Программа $gy(m \ 2 \ 0 \ t \ m \ n \ 0, 1)$
54. Допустим $t = 0$ $j = 1$
55. Вычислим $u = m p_1 + p_6 m_i$ $y = m_i$ $m = m + g$
56. Печатаем с 3 знаками $t \ m_i$
57. Печатаем с 3 знаками u
58. Если $m - p_{12} < 0$ идти к 53

59. Вычислим $n = (p_7(p_3 + p_4 + p_2) - ((p_8 + p_9)(p_3 + p_4 + p_2) + p_0 \times (p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))) / (p_5(p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))$

60. Вычислим $a = (p_7 p_2 - (p_2(p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + (p_3 + p_1 + p_{10})(p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))) - p_2(p_8 + p_9)) / (p_6(p_8 + p_9 + p_3 + p_4 + p_2))$

61. Вычислим $l_4 = (6 - l_3) \cdot 100/6$

62. Если $l_4 - l_0 > 0$ идти к 17

63. Кончаем
исполним 1

Рис. 1

$L_1 - L_2$ — коэффициенты дифференциальных уравнений, определяемые по формулам (11)—(15); $y_0, x_0, m_0, l_0, y_1, x_1, l_1, m_1, z_1, s_1, l_1, 0$ — соответственно мгновенные значения токов, протекающих в реле и дросселе во время первого и второго этапов рабочего цикла и их производные.

Операторы 1—12; 18—37; 38; 40—48; 50—58; 59—60 выполняют действия, предусмотренные соответственно блоками 1—2; 3—4; 5; 6—7; 8, операторы 13—15 — печать результатов вычисленных коэффициентов дифференциальных уравнений; 16 — введение исходных начальных условий $i_p(0) = i_d(0) = 0$ для первого этапа рабочего цикла, операторы 17, 27, 39, 49 — соответственно печать начальных условий для токов, протекающих через реле и дроссель для первого и второго этапов рабочего цикла; 61—62 — условный переход к оператору 17. На рис. 2 приведены результаты расчета нормального режима работы РРЦ для конкретных значений параметров электрических цепей и характеристик воздействия.

Расчет электрических величин РРЦ считается удовлетворительным, если начальные условия предыдущих и последующих этапов рабочего цикла при сопоставлении удовлетворяют необходимым требованиям ($L_4 > 0$, $L_4 - L_0 < 0$). При использовании в качестве дросселя вторичной обмотки трансформатора ПРТ-А и поляризованного реле типа ИМШ-0,3; ИМШ-1-2, маятникового трансмиттера МТ-1 начальные условия для первых этапов рабочих циклов совпадают с точностью до 1—2% после 2—3 рабочих циклов.

На основании полученных формул, составленного алгоритма и программы рассчитываем нормальный и шунтовой режимы работ РРЦ. При расчете шунтового режима параметры схемы замещения РЛ R_n, R_n должны быть изменены в соответствии с величиной и координатой приложения шунта.

0,28 0,25 0,03 0,04 2 2 0,12 1 0,1 0,2 0,02 0,12 2 1,36 0 0,2

$c_1 = 141,933$ $c_2 = 1050,275$

$c_3 = 132,518$ $c_4 = 313,283$

$l_1 = 176,833$ $l_2 = 1535,833$

$b = 0,000$ $n = 48,872$ $y = 0,000$ $a = 6,265$

$t = 0,029$		$y_0 = 0,339$	$t = 0,030$		$x_0 = 0,134$
$u = 0,682$			$u = 0,453$		
$t = 0,059$		$y_0 = 0,326$	$t = 0,060$		$x_0 = 0,231$
$u = 0,641$			$u = 0,370$		
$t = 0,090$		$y_0 = 0,311$	$t = 0,90$		$x_0 = 0,308$
$u = 0,613$			$u = 0,308$		
$t = 0,120$		$y_0 = 0,298$	$t = 0,120$		$x_0 = 0,368$
$u = 0,590$			$u = 0,258$		
$t = 0,150$	i_p	$y_0 = 0,289$	$t = 0,150$	i_n	$x_0 = 0,416$
$u = 0,572$	$1n, 2a$		$u = 0,219$	$1n, 2a$	
$t = 0,179$		$y_0 = 281$	$t = 0,179$		$x_0 = 0,453$
$u = 0,558$			$u = 0,188$		
$t = 0,210$		$y_0 = 275$	$t = 0,210$		$x_0 = 0,483$
$u = 0,547$			$u = 0,163$		
$t = 0,239$		$y_0 = 0,270$	$t = 0,239$		$x_0 = 0,507$
$u = 0,538$			$u = 0,145$		
$t = 0,269$		$y_0 = 0,266$	$t = 0,270$		$x_0 = 0,526$
$u = 0,531$			$u = 0,129$		
$\sigma = -0,266$		$n = 70,307$	$n = 0,526$		$a = -8,447$
$t = 0,029$		$l_0 = 0,119$	$t = 0,030$		$m_0 = 0,382$
$u = 0,226$			$u = -0,377$		
$t = 0,059$		$l_0 = 0,093$	$t = 0,060$		$m_0 = 0,290$
$u = 0,169$			$u = -0,284$		
$t = 0,090$		$l_0 = 0,070$	$t = 0,090$		$m_0 = 0,220$
$u = 0,128$			$u = -0,215$		
$t = 0,120$		$l_0 = 0,053$	$t = 0,120$		$m_0 = 0,167$
$u = 0,097$	i_p		$u = -0,164$	i_n	
$t = 0,150$	$1n, 2a$	$l_0 = 0,040$	$t = 0,150$	$1n, 2a$	$m_0 = 0,127$
$u = 0,074$			$u = -0,124$		
$t = 0,179$		$l_0 = 0,031$	$t = 0,179$		$m_0 = 0,096$
$u = 0,056$			$u = -0,095$		
$t = 0,210$		$l_0 = 0,023$	$t = 0,210$		$m_0 = 0,073$
$u = 0,042$			$u = -0,071$		
$t = 0,239$		$l_0 = 0,017$	$t = 0,239$		$m_0 = 0,055$
$u = 0,032$			$u = -0,054$		

$\delta = -0,017$		$n = 49,826$	$\kappa = 0,055$	$a = 5,855$
$t = 0,029$		$y_0 = 0,330$	$t = 0,030$	$x_0 = 0,178$
$u = 0,666$			$u = 0,417$	
$t = 0,059$		$y_0 = 0,319$	$t = 0,060$	$x_0 = 0,266$
$u = 0,628$			$u = 0,342$	
$t = 0,090$		$y_0 = 0,305$	$t = 0,090$	$x_0 = 0,335$
$u = 0,602$			$u = 0,285$	
$t = 0,120$		$y_0 = 0,294$	$t = 0,120$	$x_0 = 0,390$
$u = 0,582$	i_p		$u = 0,240$	
$t = 0,150$	$2n, 1a$	$y_0 = 0,285$	$t = 0,150$	$x_0 = 0,433$
$u = 0,565$			$u = 0,205$	
$t = 0,179$		$y_0 = 0,278$	$t = 0,179$	$x_0 = 0,467$
$u = 0,553$			$u = 0,177$	
$t = 0,210$		$y_0 = 0,273$	$t = 0,210$	$x_0 = 0,494$
$u = 0,543$			$u = 0,154$	
$t = 0,239$		$y_0 = 0,268$	$t = 0,239$	$x_0 = 0,515$
$u = 0,534$			$u = 0,138$	
$t = 0,269$		$y_0 = 0,265$	$t = 0,270$	$x_0 = 0,532$
$u = 0,528$			$u = 0,123$	
$\delta = -0,265$		$n = 70,418$	$\kappa = 0,532$	$a = -8,516$
$t = 0,029$		$l_0 = 0,121$	$t = 0,030$	$m_0 = 0,387$
$u = 0,229$			$u = -0,382$	
$t = 0,059$		$l_0 = 0,094$	$t = 0,060$	$m_0 = 0,294$
$u = 0,171$			$u = -0,288$	
$t = 0,090$		$l_0 = 0,071$	$t = 0,090$	$m_0 = 0,223$
$u = 0,130$			$u = -0,218$	
$t = 0,120$		$l_0 = 0,054$	$t = 0,120$	$m_0 = 0,169$
$u = 0,099$	i_p		$u = -0,166$	
$t = 0,150$	$2n, 2a$	$l_0 = 0,041$	$t = 0,150$	$m_0 = 0,129$
$u = 0,075$			$u = -0,126$	
$t = 0,179$		$l_0 = 0,031$	$t = 0,179$	$m_0 = 0,098$
$u = 0,057$			$u = -0,096$	
$t = 0,210$		$l_0 = 0,023$	$t = 0,210$	$m_0 = 0,074$
$u = 0,043$			$u = -0,072$	
$t = 0,239$		$l_0 = 0,018$	$t = 0,239$	$m_0 = 0,056$
$u = 0,033$			$u = -0,055$	

Предлагаемый метод позволяет рассчитывать режимы работы РРЦ, строить области оптимальной работы, а также составлять соответствующие регулировочные таблицы.

На рис. 3 приведены кривые токов, протекающих через реле и дроссель, которые рассчитаны с помощью предлагаемой методики (сплошная кривая) и полученные экспериментально (пунктир).

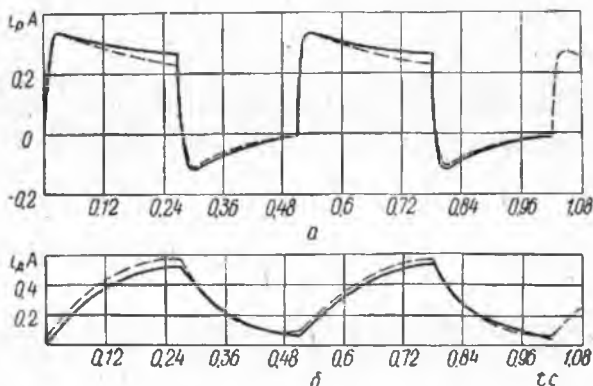


Рис. 3.

Список литературы: 1. Алексеев А. В., Рябов В. Н. Реактивные рельсовые цепи. — «Автоматика — телемеханика — связь», 1971, № 12, с. 15—17. 2. Нейман Л. Р., Демерчан К. С. Теоретические основы электротехники. Ч. I. М., «Энергия», 1966. 522 с. 3. Котляренко Н. Ф., Гащенко В. П. Основы теории реактивных рельсовых цепей. Ч. I. — В кн. «Автоматизированные системы управления и приборостроения». Вып. 43. Харьков, 1977, с. 131—144.

УДК 621.391.833

В. А. ХОРОШКО, канд. техн. наук,

Д. В. ЧИРКОВ, канд. техн. наук

Киевский институт инженеров гражданской авиации

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Вопрос выделения сигнала на фоне импульсных помех с неизвестными статистическими характеристиками изучен недостаточно. В работе рассматриваются принципы построения адаптивного обнаружителя сигналов на фоне импульсных помех с априорно неизвестными статистическими параметрами.

При известных параметрах импульсных помех оптимальный алгоритм обнаружения дается отношением правдоподобия

$$\Lambda(p_n) = [\omega_{сшх}(p)]^n / [\omega_{шх}(p)]^n. \quad (1)$$

При случайных параметрах импульсных помех применяется обычный байесовский подход, если известно априорное распределение неизвестных параметров. Если распределение неизвестно, к задачам синтеза применим эмпирический байесовский подход, который заключается в том, что если только существует непрерывная априорная плотность параметра, то при достаточно большом n более или менее безразлично, какую функцию подставлять в формулу Байеса [1, 2].

Метод синтеза адаптивных параметрических алгоритмов обнаружения заключается в адаптации к помехе путем получения и использования статистических оценок параметра θ_k [3]. Таким образом, алгоритм адаптивного обнаружителя описывается отношением правдоподобия

$$\Lambda(p_n/\theta_k^*) = \omega_{\text{сшх}}(p_n/\theta_k^*)/\omega_{\text{шх}}(p_n/\theta_k^*), \quad (2)$$

эффективность которого будет зависеть от качества оценок.

Рассмотрим задачу синтеза обнаружителя импульсных сигналов с амплитудой U_1 на фоне гауссова шума и импульсной помехи с неизвестной скважностью Q и амплитудой U_2 . Условная плотность распределения огибающей аддитивной совокупности гауссова шума сигнала и импульсной помехи

$$\begin{aligned} \omega_{\text{сшх}}(p) = & \left(1 - \frac{1}{Q}\right) \frac{p}{\sigma^2(1+a^2)} e^{-\frac{p^2}{2\sigma^2(1+a^2)}} + \\ & + \frac{p}{Q\sigma^2(1+a^2)} e^{-\frac{p^2+U_2^2}{2\sigma^2(1+a^2)}} I_0\left[\frac{pU_2}{\sigma^2(1+a^2)}\right], \end{aligned} \quad (3)$$

где p — огибающая совокупности сигнала и помех; $a^2 = \frac{U_1^2}{2\sigma^2}$; σ^2 — дисперсия гауссова шума; U_1 — амплитуда сигнала; U_2 , Q — амплитуда и скважность импульсной помехи; $I_0(\cdot)$ — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Составим отношение правдоподобия

$$\begin{aligned} \Lambda(p_n) = & \frac{\left(1 - \frac{1}{Q}\right) \frac{p}{\sigma^2(1+a^2)} e^{-\frac{p^2}{2\sigma^2(1+a^2)}} + \frac{p}{Q\sigma^2(1+a^2)} e^{-\frac{p^2+U_2^2}{2\sigma^2(1+a^2)}} I_0\left[\frac{pU_2}{\sigma^2(1+a^2)}\right]}{\left(1 - \frac{1}{Q}\right) \frac{p}{\sigma^2} e^{-\frac{p^2}{2\sigma^2}} + \frac{p}{Q\sigma^2} e^{-\frac{p^2+U_2^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{pU_2}{\sigma^2}\right)} = \\ = & \left(\frac{1}{1+a^2}\right)^n \prod_{k=1}^n e^{-\frac{p^2(2+a^2)}{2\sigma^2(1+a^2)}} A_k, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$A_k = Q - 1 + e^{-\frac{U_2^2}{2\sigma^2(1+a^2)}} I_0 \left[\frac{\rho U_2}{\sigma^2(1+a^2)} \right] \bigg/ Q - 1 + e^{-\frac{U_2^2}{2\sigma^2}} I_0 \left(\frac{\rho U_2}{\sigma^2} \right).$$

Полученный алгоритм обнаружения (4) сложен в реализации и поэтому необходима его аппроксимация. Предварительные исследования показали, что для значений $Q \leq 50$ данный алгоритм можно аппроксимировать зависимостью [3]

$$y_k = \begin{cases} \rho & \text{при } \rho \leq \frac{B}{2}; \\ 0 & \text{при } \frac{B}{2} < \rho < B; \\ \rho - B & \text{при } \rho \geq B, \end{cases} \quad (5)$$

где $B = f(U_2, Q)$.

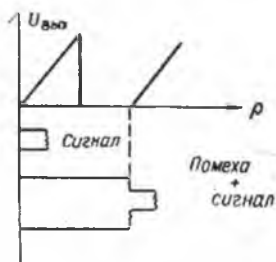


Рис. 1. Амплитудная характеристика обнаружителя.

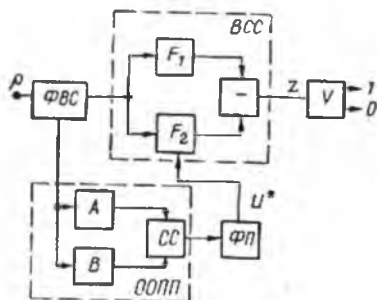


Рис. 2. Структура адаптивного обнаружителя.

Вид данной зависимости показан на рис. 1. Заменяя в (5) неизвестные параметры U_2, Q их оценками U_2^*, Q^* , получаемыми с устройства опознавания, и оценки параметров импульсной помехи, получаем окончательную запись алгоритма адаптивного обнаружителя:

$$y_k = \begin{cases} \rho & \text{при } \rho \leq \frac{B^*}{2}; \\ 0 & \text{при } \frac{B^*}{2} < \rho < B^*; \\ \rho - B^* & \text{при } \rho \geq B^*. \end{cases} \quad (6)$$

Структура адаптивного алгоритма обнаружения сигналов представлена на рис. 2, где ФВО — устройство формирования выборочных отсчетов, работающее в режиме обучения с учителем, т. е. содержащее ρ_m — обучающую выборку и ρ_n — подлежащую проверке на наличие сигнала; ВСС — вычислитель сигнальной статистики; ООПП — устройство опознавания и оценки параметров импульсной помехи; ФП — блок функциональных преобразователей; V — порог решения.

Априорная информация о Q , U_2 обычно заключается в указании интервалов их возможных значений.

В результате обработки обучающей выборки p_m в вычислителе опознавания выносятся решение о наличии или отсутствии импульсной помехи. При условии превышения порога опознавания V производится считывание оценки U_2^* , формируемой вычислителем B , на функциональный преобразователь ФП. В ФП отсчет U_2^* запоминается на время формирования очередной обучающей выборки p_m и используется для корректировки параметра в алгоритме (6), реализуемом вычислителем F .

Техническая реализация адаптивного алгоритма может быть выполнена по блок-схеме, показанной на рис. 3.

В качестве простейшей схемы опознавателя импульсной помехи применяется схема триггера Шмитта с порогом срабатывания $V_{оп}$. Сигнал опознавания поступает на схему совпадения. Импульсная помеха через схему совпадения подается на измеритель амплитуды [4]. Сигнал с выхода измерителя амплитуды поступает на функциональный преобразователь. Порог V усилителя регулируется сигналом функционального преобразователя.

Устройство обнаружения состоит из двух каналов, выполненных на усилителях в интегральном исполнении. Схема ключа реализована на базе дифференциального усилителя. Выходной сигнал поступает на квантизатор V_p , который выдает решение о наличии или отсутствии сигнала на фоне импульсных и шумовых помех.

Данная блок-схема реализована и прошла испытания в автоматизированной системе управления процессом прочностных испытаний конструкций при наличии мощных промышленных помех.

Система обнаружения сигнала на фоне импульсных помех обеспечила работоспособность автоматизированной системы управления при отношении помеха — сигнал, равном 5—10.

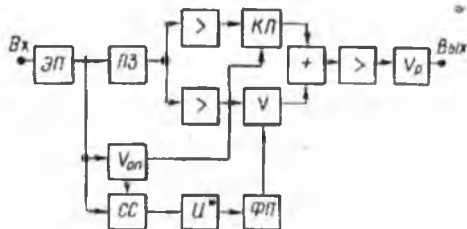


Рис. 3. Блок-схема адаптивного обнаружителя: ЭП — эмиттерный повторитель; ЛЗ — линия задержки; КЛ — ключ.

Список литературы: 1. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М., «Сов. радио», 1968. 750 с. 2. Робинс Г. Эмпирический байесов подход к статистике М., «Математика», 1964. 250 с. 3. Чирков Д. В. Исследование некоторых последетекторных алгоритмов обнаружения радиолокационных сигналов на фоне импульсных помех с неполностью известными статистическими характеристиками. Автор. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев, 1972. 23 с. 4. Чирков Д. В., Валеев Э. Я., Зарукин А. И. Измеритель средней амплитуды хаотических импульсных помех. — «Информ. листок», 1976. № 24—76. ЦНТП, Ульяновск. 4 с.

Н. И. ЛОГВИНА,

В. А. ХОРОШКО, канд. техн. наук,

Д. В. ЧИРКОВ, канд. техн. наук

Киевский институт инженеров гражданской авиации.

АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Интенсивное развитие современной измерительной техники обусловлено широким использованием интегральной элементной базы и качественно новых датчиков.

Необходимость обработки больших объемов измерительной информации, изменяющейся в широких, часто экстремальных диапазонах, и требования повышения достоверности информации выдвинули на первый план вопросы оптимизации качества измерительных систем.

Сложность задач оптимизации — многомерность целевых функций, большое число ограничений, накладываемых на измерительные системы, — привела к необходимости широкого использования для решения этих задач ЦВМ с достаточно высоким быстродействием и большим объемом оперативной памяти.

Все задачи оптимизации качества измерительных систем можно разделить на два класса: задачи оптимизации качества эксплуатируемых систем и оптимизации качества проектируемых систем [1]. Задачи обоих классов решаем методами математического программирования: сведением общей функциональной зависимости, описывающей процесс, к минимуму или максимуму. Этот метод можно реализовать на ЭВМ путем перебора возможных значений определяющих факторов. Количество значений каждого переменного параметра определяется необходимой точностью исследования процесса и возможным диапазоном изменения параметров.

Рассмотрим решение задачи параметрической оптимизации качества (параметрического синтеза при выбранной структуре) измерительной схемы. Схема является первичным преобразователем измерительной информации в автоматизированной информационной системе, управляющей технологическими процессами. В качестве датчиков могут использоваться резистивные датчики (термометры сопротивления, термопары, проволочные и полупроводниковые терморезисторы), которые обладают нелинейностью характеристик и чувствительны к внешним неизмеряемым воздействиям.

Показателем качества для решения задачи оптимизации выбираем пересечение диапазонов контролируемого параметра и мешающего воздействия: колебания температуры, колебания

влажности, промышленные помехи. Ограничениями, накладываемыми на схему, является выполнение условий линейризации и термокомпенсации. В дальнейшем задачи оптимизации рассматриваем на примере синтеза измерительной схемы для полупроводниковых тензодатчиков. Цель задачи оптимизации — расчет коэффициента a_i синтезируемой схемы.

Измерительная схема, синтезированная на базе последовательного функционального преобразователя, показана на рис. 1, где R_1, R_2, R_3 — элементы мостовой схемы; U_1, U_2 — операционные усилители; a_1, a_2, a_3, a_4 — коэффициенты передачи, представляющие собой отношение сопротивления в цепи обратной связи усилителя к сопротивлению, включенному на его входе.

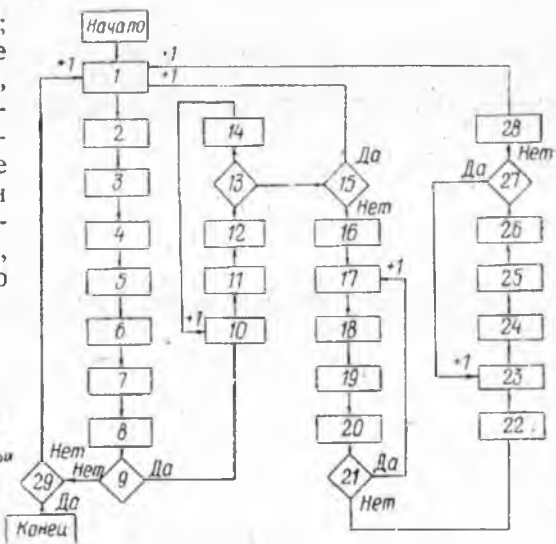
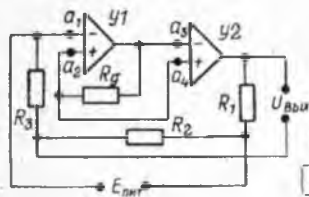


Рис. 1. Измерительная схема, синтезированная на базе функционального преобразователя.

Рис. 2. Блок-схема программы параметрической оптимизации.

Выходное напряжение схемы [2] $U_{\text{вых}} = E_{\text{пит}}/R_{\text{вх}}^2(A + B + \delta_n)$, где $A = 2(a_1a_2a_4R_0(R_0c_{\text{п}} - R_{\text{вх}} - R_{\text{вх}}c_{\text{п}}) + a_1a_4R_{\text{вх}}^2(1 + a_2) + a_1a_3 \times R_{\text{вх}}(R_{\text{вх}} + a_2R_{\text{вх}} - a_2R_0 - a_2R_0c_{\text{п}}) + a_1a_4R_0(a_2R_0 - R_{\text{вх}} - a_2R_0 \times c_{\text{п}}^2 - R_{\text{вх}}c_{\text{п}})$ — постоянная часть выражения, которая определяет величину напряжения на выходе схемы при отсутствии деформации; $B = 2a_1a_2a_4R_0c_1(R_0 + R_0c_{\text{п}} - R_{\text{вх}}) - a_1R_{\text{вх}}R_0c_1(a_2a_3 + a_4)$ — член, характеризующий чувствительность схемы; $\delta_n = (2a_1a_2a_4R_0^2c_1c_2\varepsilon^3 + a_1a_2a_1R_0^2c_2^2\varepsilon^4)(1 + c_{\text{п}})$ — остаточная нелинейность.

Из анализа выражения (1) видно, что линейный закон изменения выходного напряжения от деформации и термокомпенсация обеспечиваются путем подбора коэффициентов передач. Последние определяются величинами $R_0, R_{\text{вх}}, c_1, c_2, c_{\text{п}}$, которые имеют разброс параметров от номинальных. Кроме того, коэф-

коэффициенты c_1, c_2 зависят от температур. Поэтому при выборе коэффициентов передачи, обеспечивающих линейный закон изменения выходного напряжения и термокомпенсацию, необходимо учитывать следующие факторы: диапазон измеряемых деформаций, температурный диапазон, условия наклейки датчиков, разброс параметров датчика и операционных усилителей.

Рассмотрим алгоритм параметрической оптимизации, блок-схема которого приведена на рис. 2. Данный алгоритм решает задачи выбора коэффициентов a_1, a_2, a_3, a_4 из условий линейризации и термокомпенсации, выбора оптимального пересечения диапазонов измерения контролируемого параметра и температуры, определения возможного диапазона разброса параметров измерительной схемы из условия ухудшения чувствительности схемы ($\pm 1\%$). Условие линейризации выводим из уравнения цепи (1) с учетом закона изменения R_d под действием контролируемого параметра. Для этого приравниваем нулю коэффициенты при ϵ^2 , а для большей точности также коэффициенты при ϵ^3 . Из этих выражений аналитически определяем формулы для предварительного расчета величины коэффициентов передач.

Решая алгоритм, вводим паспортные данные для R_0 — сопротивления датчика при отсутствии действия контролируемого параметра; $R_{вх}$ — входного сопротивления операционного усилителя; R_{01} — сопротивления в цепи обратной связи операционного усилителя, которое обычно выбирается 0,1 или 1 МОм; c_1, c_2 — постоянных для датчика коэффициентов, зависящих от удельного сопротивления материала, из которого изготовлен датчик; начальных значений измеряемого параметра и величин приращений температуры (при чувствительности датчика к колебаниям температуры). Организовываем цикл изменения температуры, причем начальное значение переменной цикла j принимаем равным единице (процедура 1).

Температуру рассчитываем по формуле $T = (T_{\max} - j)^\circ \text{C}$, где $T_{\max}$ — максимальная рабочая температура датчика (процедура 2).

Вычисляем значения коэффициентов c_1, c_2 с учетом изменения их величины в связи с эксплуатацией датчика. Изменение очень значительно. Так, для полупроводниковых тензорезисторов оно изменяется вследствие наклейки датчика на исследуемую конструкцию и из-за колебаний окружающей температуры (процедура 3).

По предварительно рассчитанным формулам выбираем начальные коэффициенты передач для данной измерительной схемы (процедура 4).

Из условий термокомпенсации (процедуры 6,8) и линейризации (процедуры 10, 11, 12) подбираем оптимальные для данной температуры значения коэффициентов a_i . Коэффициенты вычисляем по формуле $a_i = a_{n_i} + k(-1)^k \Delta a_i$ (процедура 5), что соответствует прошагиванию по циклической переменной k возможного диапазона изменения. Условие термокомпенсации выводим

аналитически из равенства величин приращений, вызванных колебаниями температуры окружающей среды.

При выполнении условий термокомпенсации и линеаризации (квадрат остаточной нелинейности $\leq 0,01\%$) производим печать температуры найденных для данной температуры оптимальных коэффициентов и печать величины возможного диапазона изменения измеряемого параметра. Кроме того, заполняем массив оптимальных коэффициентов (процедура 14).

Окончательный выбор коэффициентов a_i (процедура 17) определяется максимальным пересечением диапазонов изменения температуры и измеряемого параметра (процедуры 15, 16).

Для температуры $T = 21^\circ$ определяем чувствительность схемы (процедура 19). Она характеризуется величиной приращения напряжения при изменении измеряемого параметра на единицу.

Организовывается два цикла: для максимального увеличения значений $R_0, R_{вх}, R_{01}$ (начальное значение циклической переменной h_1 принимаем равным единице) (процедура 20) и для максимального уменьшения значений $R_0, R_{вх}, R_{01}$ (начальное значение циклической переменной h_2 принимаем равным единице) (процедура 25).

Из условия изменения чувствительности измерительной схемы менее чем на 1% (процедура 23) $\left| \frac{B_{21^\circ C} - B}{B_{21^\circ C}} / 100 \right| \leq 0,01$ вычис-

ляем максимально допустимые $R_0 = R'_0 + h_1 \Delta R_0$; $R_{вх} = R'_{вх} + h_1 \Delta R_{вх}$; $R_{01} = R'_{01} + h_1 \Delta R_{01}$ (процедура 21) и минимально допустимые параметры схемы $R_0 = R'_0 + h_2 \Delta R_0$; $R_{вх} = R'_{вх} + h_2 \Delta R_{вх}$; $R_{01} = R'_{01} + h_2 \Delta R_{01}$ (процедура 26). Если температура становится меньше $-60^\circ C$, происходит останов вычислений (процедура 30).

Рассмотренный алгоритм наряду с параметрическим синтезом измерительной схемы (выбор коэффициентов a_i) позволяет достаточно подробно и объективно анализировать ее работоспособность: определить оптимальные условия окружающей среды, диапазон измерения контролируемого параметра, диапазон разброса параметров.

Следовательно, в процессе синтеза (оптимизации) приходится корректировать или варьировать совокупность условий и ограничений, а также состав показателей качества. Синтез (оптимизация) системы, а следовательно, и их составных частей — схем, можно считать завершенным лишь при выполнении следующих условий [1].

Решение, полученное в результате синтеза, является достаточно определенным, т. е. удовлетворяет всем сформулированным исходным данным (включая критерий оптимальности).

Полученное решение является достаточно устойчивым при вариации (в определенных пределах) исходных данных, включая вариации отношения предпочтения.

Список литературы: 1. Гуткин Л. С. Оптимизация радиозлектронных устройств по совокупности показателей качества. М., «Сов. радио», 1975. 367 с. 2. Хорошко В. А. Компенсация погрешностей, обусловленных температурной нестабильностью и нелинейностью характеристики полупроводниковых тензодатчиков. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Киев, 1975. 20 с.

УДК 612.82.014.42.001.57

Г. А. КОЛОТЕНКО, Г. И. ЕВТУШЕНКО, д-р мед. наук,
С. Ю. ДИДЕНКО, канд. техн. наук

Харьковский научно-исследовательский институт гигиены
труда и профзаболеваний

СОПРЯЖЕНИЕ ВЕРОЯТНЫХ ПОДСИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СВЯЗЕЙ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМИ ФУНКЦИЯМИ АСУ

Кибернетический анализ пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга человека-оператора АСУ при афферентных раздражителях, в частности, при психофизиологическом воздействии, позволяет гомоморфно моделировать специфические особенности биоэлектрических межцентральных отношений коры и подкорковых образований. При различных функциональных состояниях данные особенности обладают уточненными интегративными и дифференциальными свойствами. Изучение этих свойств является объективной необходимостью теоретических разработок биологической и медицинской кибернетики, схемотехники, бионики, систем автоматизированного управления, что является целью представляемого материала.

Показатели когерентного, фазового, периодометрического, корреляционного, спектрального, частотного и других методов количественного анализа фоновых электроэнцефалосигналов (ЭЭС) оказываются малоэффективными при сопряжении с агрегатными системами вычислительной техники (АСВТ), так как индивидуальные особенности электрической активности головного мозга оказывают доминирующее влияние даже в профильтрованном («одном физиологическом») диапазоне частот, не говоря о том, что в реальной ЭЭС-картине частоты следования, амплитуды и фазы варьируют, структурно «перемешивают», создают в отображаемой системе крайнюю нелинейность ЭЭС как в пространстве, так и во времени. Одной из методологических попыток информационного нейрокибернетического поиска в этом направлении является построение корреляционных плеяд и «звездчатых корреляций» — признаков синдрома [1]. Если видеть в фоновой ЭЭС только эту нелинейность, то количественный анализ при моделировании ЭЭС сводится к индивидуальному подходу и нейрокибернетический анализ усложняется до такой степени, что

техническая реализация его кажется невозможной. А суть в том, что при концептуальных подходах всепоглощающее эйдическое разнообразие случайных биопотенциалов головного мозга вуалирует вероятностные составляющие. Исходя из позиций бесконечного разнообразия межцентральных отношений, можно представить: непрерывно меняющийся бессистемный хаос возмущений формирует редко случайные, стохастические отклики, выступающие в форме переменных пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга. Вместе с тем из эксперимента видно, что на фоне множества иерархических систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, имеющих разнонаправленный характер, выявляются распределения весов закодированных систем совмещенных и спектральных синхронных и асинхронных связей головного мозга индивидуальных ЭЭС, имеющих общую направленность. В последнем случае системы синхронных и асинхронных связей головного мозга характеризуют вероятностные пространственно-временные отношения, являющиеся, по-видимому, продуктом интимных механизмов церебральных систем и структур. Если же не учитывать вероятностную составляющую систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, то результаты фоновой ЭЭС необходимо в любом случае сводить к многозначности заключений, к системному, но не направленному беспредельному разнообразию биоэлектрических процессов головного мозга. В таком представлении отрицаются аналогии систем синхронных и асинхронных связей головного мозга и о сопряжении их с входными параметрами АСВТ не может быть речи. В действительности дело обстоит иначе.

Фоновая ЭЭС отображает неопределенное функциональное состояние оператора АСУ. Но при кибернетическом анализе важно изменение веса, структуры и вариабельности множества доминантных иерархических систем синхронных и асинхронных пространственно-временных связей головного мозга при функциональных состояниях, отображающих наиболее существенные моменты эргатической системы. В этом случае появляются реалистические возможности, если системы пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга человека-оператора АСУ дифференцируются. Дифференциацию же систем можно провести только по вероятностным составляющим, дифференциацию состояний операторов АСУ в нейрокибернетическом аспекте, в частности, — при помощи суггестий.

Величина индивидуальных изменений фоновой ЭЭС во времени и пространстве также относительна, как относительны изменения функциональных состояний организма оператора АСУ. Тогда, если однотипный, «монокроматический» афферентный раздражитель, например фонетический звук, вызывает маловероятный отклик, то анализируем ЭЭС выборки, связанные со стохастическими, возможно, «побочными» процессами, обусловли-

вающими фон целостных процессов, из которых вырисовываются извилины вероятностных пространственно-временных направлений. Вместе с тем, если взглянуть с другой стороны, фонетический раздражитель в данном случае выступает в качестве основного возмущения потому, что он, во-первых, известен, во-вторых, управляем, а также потому, что маловероятность отклика в форме иерархических систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга с неопределенным распределением весов определяется неярко выраженной функциональной состоянием операторов АСУ и быстрой сменой одного состояния другим, чаще всего неизвестных и в любом случае неуправляемых. В таком случае можно предположить, что динамический стереотип, определяющий топологию рабочих констелляций, в области случайных пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных связей головного мозга может случайно корректироваться, но не меняться в принципе. Стохастические отклики в таком случае являются своеобразными помехами, экзальтирующими пространственно-временное распределение биопотенциалов головного мозга оператора АСУ.

Такой подход связан с помехоустойчивостью ЭЭС, ее случайной устойчивостью пространственно-временных межцентральных отношений церебральных систем. Если отклик является помехой, то в ЭЭС фона обнаруживается вероятностный элемент, то, как не парадоксально, «помеха» в нейрокибернетическом аспекте может иметь практическое значение. Эта особенность множества иерархических систем синхронных и асинхронных связей головного мозга может найти применение при разработке ЭВМ пятого-шестого поколений. Установление же вероятностной зависимости между функциональным состоянием и откликом является самостоятельной областью объективной дифференциальной диагностики и, как предполагается, будет использована при проектировании и конструировании эргатических систем с использованием ЭВМ тех же поколений. В любом случае важно выявить степень случайности отклика.

Если отклик стремится к нулю, то он маловероятен, если же устремлен к достоверности, — то высоковероятен. В любом случае иерархические системы синхронных и асинхронных связей головного мозга случайны, так как вероятность — мера случайности. Под воздействием раздражителей определенные системы и структуры головного мозга нормы генерируют биоэлектрическую активность — в одних случаях устремляющуюся к нулю, в других — к единице. В целостном восприятии образуется аналоговая картина биоэлектрических полей головного мозга.

Появление потенциалов на двух, трех и более зонах регистрации формирует в последовательные моменты времени системы и подсистемы синхронных (изохронных) и асинхронных (полихронных) связей головного мозга. Если бы анализировали ЭЭС-

процесс, то можно было бы наблюдать плавный переход от одной системы межцентральных отношений к другой, от диффузности — к локальности и, наоборот, от генерализованных (гиперсинхронных) ЭЭС к асинхронным, рассогласованным во времени, появляющимся только на одной любой регистрируемой зоне головного мозга. Переход от систем пространственно-временных связей головного мозга с меньшими степенями свободы к большим, т. е. от локальной пространственно-временной организации потенциалов головного мозга к диффузной, позволяет выявить изменения иерархии межцентральных отношений головного мозга. Целенаправленные афферентные раздражители дают возможность дифференцировать в системах и подсистемах синхронных и асинхронных связей головного мозга вероятностную компоненту, что косвенно подтверждается данными когерентного и фазового анализов электроэнцефалограмм (ЭЭГ) [2].

Таким образом, связывая форму и степень проявления множества систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга с вероятностью формирования структур пространственно-временных организаций потенциалов регистрируемых зон, можно перейти к групповому нейрокибернетическому анализу, позволяющему выявить на фоне маловероятных переменных систем синхронных и асинхронных связей вероятные, доминантные строения структур и их вес за ЭЭС-выборку.

При нейрокибернетическом анализе ЭЭС «осуществляется преобразование пространства сигналов-реакций в пространство количеств информации (или) энтропии» [3]. Поэтому позиционные системы вероятностных синхронных и асинхронных связей головного мозга, закодированные в двончной системе счисления, можно сопрягать с АСВТ. Согласующие бионические устройства, комплексы и системы, входными сигналами которых является вес систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга операторов АСУ при различных функциональных состояниях, реализуют автоматические программы сопряжения. Информацию с выхода преобразовательных устройств вводим непосредственно в АСВТ.

Кроме того, нейрокибернетический анализ и гомоморфное моделирование создают предпосылки для объективной оценки динамики перестройки биоэлектрической активности головного мозга в момент перехода от экстремальных ситуаций к относительному отдыху, позволяет корректировать гомеостаз организма оператора АСУ при различных психическом и нервном напряжениях.

Возможность реализации названных особенностей подтверждается экспериментальным материалом, полученным по конъюнктивной методике, разработанной одним из авторов данной статьи Г. А. Колотенко и доложенной им на второй Всесоюзной конференции по биологической и медицинской кибернетике.

В статье приводятся некоторые гомоморфные модели множества доминантных систем совмещенных синхронных связей головного мозга, относящиеся согласно предложенной классификации ко второму и третьему структурным иерархическим рангам. Приведен анализ ЭЭС 40 операторов АСУ в период фона, ауто-суггестии покоя, фотостимуляции (ФС) 8 Гц. Анализ 10-секундных ЭЭС-выборки проведен на уровне 5 мкВ.

Нейрокибернетический анализ ряда маркированных систем совмещенных синхронных связей $H_{6,22}^3$ показывает, что для систем, преимущественно расположенных на правой стороне, характерно включение лобной зоны противоположной стороны. Эти системы ограничены диапазоном, бит: $\sup \mu' = 22$, $\inf \mu = 8$, $\sup \sigma = 22$, $\inf \sigma = 8$, $\sup v = 150$, $\inf v = 50$, относительные ошибки $\sup m = 6$, $\inf m = 2$, что согласуется с $H_{1,7}^2$. Из анализа однородного вариационного ряда систем совмещенных синхронных связей головного мозга трехкомпонентных структур $H_{23,30}^3$ видно, что системы $H_{8,22}^2$ совмещенных синхронных связей головного мозга правой стороны, коммутируя одну из областей левой стороны, характеризуются следующими весовыми диапазонами, бит: математические ожидания (центры тяжести) $\sup \mu = 30$, $\inf \mu = 15$, среднеквадратические отклонения $\sup \sigma = 40$, $\inf \sigma = 15$, коэффициенты вариации $\sup v = 320$, $\inf v = 80$, относительные ошибки расположены в интервале 5—10.

Характеристическая картина пространственно-временных организаций совмещенных синхронных потенциалов левой стороны такая же, как при отключении F_d . Это не противоречит направленности систем совмещенных синхронных связей $H_{23,28}^2$ двухкомпонентных структур.

Для доминантной системы совмещенных синхронных связей $F_d - p_d - F_s (H_{12}^3)$ разброс весов среднеквадратических отклонений не превышает 10 бит. Система совмещенных синхронных связей $F_d - p_d - F_s$ при различных функциональных состояниях отличается по коэффициенту сравнения $k_a = \sigma_{\Phi} / \sigma_n = 2,35$, $k_c = \sigma_n / \sigma_{\Phi_0} = 0,5$. В период фона и ауто-суггестии покоя среднеквадратические отклонения равны.

На поле пониженного синхронизма пространственно-временных связей головного мозга систем $H_{6,21}^3$ выделяется биоэлектрическая мозаика, маркируемая системой совмещенных синхронных связей $F_d - F_s - T_s (H_{16}^3)$. Эта характеристическая система совмещенных синхронных связей головного мозга имеет при ауто-суггестии покоя $\sigma_n = 28,1$ бит, при ФС 8 Гц $\sigma_{\Phi_0} = 9,5$ бит и отличается по коэффициенту сравнения в три раза ($k_a = \sigma_n / \sigma_{\Phi_0} = 2,95$). Если коэффициент вариации в период ауто-суггестии покоя $u_n = 255$ бит, то по коэффициенту сравнения система совмещенных синхронных связей при этих двух функциональных состояниях дифференцируется так: $k_c = v_n / v_{\Phi_0} = 3,49$.

Экстремальная величина относительной ошибки при аутосуггестии покоя $m_n = 7,73$ бит.

Для системы совмещенных синхронных связей $F_d - o_d - p_s$ (H_{22}^3) характерен рост $\mu_{\phi s}$ (31 бит) и уменьшение μ_ϕ и μ_n (соответственно 19 и 25 бит). Центр тяжести смещается в результате редко случайного веса системы совмещенных синхронных связей головного мозга одного из операторов АСУ (вес системы $x = 140$ бит). Основная масса веса систем совмещенных синхронных связей головного мозга ЭЭС-выборки других операторов АСУ не превышает 25 бит. Для двух индивидуальных систем совмещенных синхронных связей головного мозга наблюдается два маловероятных выброса. Поэтому среднеквадратические отклонения в период фона составляют 31,7 бит. От фотостимуляции 8 Гц они отличаются в 2,6 раза. При аутосуггестии покоя одной индивидуальной системы ($F_d - o_d - p_s$) совмещенных синхронных связей вес достигает экстремального значения ($\sup x = 70$ бит), веса других индивидуальных систем совмещенных синхронных связей головного мозга распределены равномерно.

Системы совмещенных синхронных связей $H_{38,40}^3$ при различных функциональных состояниях имеют максимальные веса μ , σ . В этом ряду доминантных систем совмещенных синхронных связей выделяется функция H_{40}^3 . Она дифференцируется по коэффициенту сравнения $k_o = \sigma_\phi / \sigma_{\phi s} = 2,8$, $k_o = v_n / v_{\phi s} = 8,18$. Наибольшая относительная ошибка при аутосуггестии покоя $\sup m_n = 11,6$ бит. На фоне данного кортежа систем формируется устойчивая, вероятная система совмещенных синхронных связей, в основе которой лежит подструктура $o_d - p_d$.

При переходе доминантных систем совмещенных синхронных связей головного мозга от двухкомпонентных структур к трехкомпонентным основной вес систем акцентируется на левой стороне, т. е. намечается билатеральная асимметрия систем совмещенных синхронных связей головного мозга. Она отображена главным образом доминантными системами $H_{50,51}^3$, H_{48}^3 . Для одной из систем совмещенных синхронных связей ($T_s - o_s - p_d$) этого кортежа систем связей (бит): $\mu_\phi = 28$, $\mu_n = 22$, $\mu_{\phi s} = 31$, $\sigma_n = 46,1$, $\sigma_{\phi s} = 20$, $k_o = \sigma_\phi / \sigma_{\phi s} = 2,32$, $K_s = \sigma_n / \sigma_{\phi s} = 1,66$. Вторая характеристическая система совмещенных синхронных связей $T_s - p_s - p_d$ имеет такие параметры: среднеквадратическое отклонение ЭЭС фона составляет 53,1 бит, т. е. в 1,82 раза выше, чем среднеквадратическое отклонение при ФС 8 Гц. Коэффициент сравнения $K_o = \sigma_\phi / \sigma_n = 2,01$. Для третьей системы этого же кортежа ($F_s - o_s - p_d$) также заметно дифференцирующее отличие, $k_o = \sigma_n / \sigma_{\phi s} = 2,32$ при $\mu = 23$ бит, $\sigma_\phi = 30,7$ бит, $K_s = \sigma_n / \sigma_{\phi s} = 1,87$ при $\mu_n = 20$ бит, $\sigma_n = 24$ бит. Стабильность p_d даже из приведенных примеров свидетельствует о том, что активацию вариационных систем совмещенных синхронных связей

головного мозга левой стороны, возможно, обуславливает правосторонняя теменная область.

Подсистема $o_d - p_d$ кортежа систем совмещенных синхронных связей головного мозга $H_{38,40}^3$ менее интенсивно подключает в синхронное функционирование отдельные зоны левой стороны головного мозга.

Для кортежей доминантных систем совмещенных синхронных связей $H_{41,42}^3$, $H_{46,48}^3$ характерна более жесткая связь между степенями свободы, чем при аутосуггестии покоя и фона. Структуры с мягкими связями между «степенями свободы» доминантных систем пространственно-временных совмещенных синхронных связей разнообразятся на левой стороне и дополняются менее выраженными и интенсивными на правой. Доминантные системы совмещенных синхронных связей $F_s - o_s - p_d (H_{48}^3)$, $T_s - o_s - p_d (H_{50}^3)$, $T_s - p_s - p_d (H_{51}^3)$, характеризующие пространственно-временное распределение биопотенциалов головного мозга левой стороны, существенно отличаются от систем совмещенных синхронных связей $o_d - p_d - T_s (H_{38}^3)$, $o_d - p_d - o_s (H_{39}^3)$, $o_d - p_d - p_s (H_{40}^3)$ правой стороны. Менее выраженные системы совмещенных синхронных связей дополняют возможности дифференциации систем синхронных и асинхронных связей головного мозга при различных функциональных состояниях.

Негэнтропийность таких систем синхронных связей головного мозга при различных функциональных состояниях операторов АСУ представляет собой, как указано ранее, панораму биоэлектрических волновых флуктуаций, на фоне которой конструируются вероятные синхронные и асинхронные связи головного мозга разнообразной структуры оригинальной весовой интенсивности. Информация в таком случае раскрывает изменение пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга при различных функциональных состояниях.

Таким образом, имеется возможность дать аналитическую оценку влиянию исследуемых факторов и с достоверностью установить, какие из изучаемых факторов существенно сказываются на конечных результатах анализа вариабельных пространственно-временных потенциалов головного мозга операторов АСУ.

Изучаемая иерархия систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга влияет не только на единично-специфические, но и на целостные пространственно-временные простые и сложные связи головного мозга. Поэтому, детально анализируя и синтезируя пространственно-временные организации потенциалов головного мозга различных иерархических структур, сохраняется возможность формирования общей картины взаимосвязанных пространственно-временных отношений между различными участками головного мозга при различного рода возмущениях. Расчет вероятностно-статистических числовых характеристик отдельных иерархических систем синхронных и асин-

хронных связей головного мозга логически объединяется, сводится в единое и неразделимое целое, делая аргументацию и степень обоснованности убедительной и достоверной.

Выявленные особенности тем более важны, что на данном этапе развития биологии и медицины предпочтение отдается изучению интегративных функций церебральных систем, наблюдается прогрессивное стремление отобразить целостное функционирование функций коры и подкорково-стволовых образований, вскрыть неразрывную, кооперативную связь структур и отдельных элементов, выступающих в форме подсистем. При таком подходе имеется резерв для раскрытия дополнительных возможностей функций центральной нервной системы, уточняются формулировки диагностических параметров, на первый взгляд мало-заметных показателей и изменений, необходимых для разработки и совершенствования медикобиологических электроприборов, используемых, в частности, при проектировании сложных эргатических систем.

Ценность конъюнктивного и дизъюнктивного методов объективной дифференциальной диагностики в том, что исследования, проводимые при их помощи, не сопровождаются отрицательными психофизиологическими эффектами, позволяют раскрыть некоторые стороны нервно-эмоциональной сферы, наиболее чувствительной при умственной нагрузке операторов автоматизированных систем управления.

Одномоментный и многоуровневый кибернетический анализы множества регистрируемых зон головного мозга позволяют провести интегративный и дифференциальный анализы нейрофизиологических процессов. Разработка многоканального логического устройства для анализа переменных пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга на целых интегральных системах, насчитывающих десятки миллиардов логических ячеек в кубическом сантиметре, а также использование субблоков даст возможность вплотную подойти к выявлению существенных сторон высоконадежных регуляторных механизмов головного мозга операторов АСУ.

Список литературы: 1. *Лещенко А. Г.* Особенности и механизмы изменений высшей нервной деятельности при очаговой патологии лимбических структур человека.— В кн.: XXIV Всесоюз. совещ. по проблемам высшей нервной деятельности, посвящ. 125-летию со дня рождения И. П. Павлова, 3—7 июня 1974 г. (материалы секционных заседаний). М., 1974. 154 с. 2. *Русинов В. С., Гриндель О. М.* Межцентральные отношения в коре большого мозга человека по данным математического анализа ЭЭГ.— В кн.: XXIV Всесоюз. совещ. по проблемам высшей нервной деятельности, посвящ. 125-летию со дня рождения И. П. Павлова (материалы симпозиумов). М., 1974. 6 с. 3. *Усов В. В.* Информационный подход к оценке результатов эксперимента.— В кн.: Статистическая электрофизиология (материалы симпозиума). Ч. I. Паланга — Вильнюс, 1968. 569 с.

Г. А. КОЛОТЕНКО, Г. И. ЕВТУШЕНКО, д-р мед. наук,
С. Ю. ДИДЕНКО канд. техн. наук

Харьковский научно-исследовательский институт гигиены
труда и профзаболеваний

СИСТЕМНО-КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ВЕРОЯТНЫХ ПОДСИСТЕМ СВЯЗЕЙ — НЕОТЪЕМЛЕ МЫХ ЗВЕНЬЕВ АСУ

В предисловии в книге Ф. Джорджа «Мозг как вычислительная машина» П. К. Анохин писал: «Моделирование — вот понятие, с которым сейчас наиболее тесно связаны надежды на кибернетический подход и математическое изучение жизненных процессов и функций». И далее продолжал: «Смоделировав какой-либо процесс или явление жизни с достаточной степенью точности, мы получаем в руки возможность произвольно изменять его, т. е. в сущности управлять им» [1, с. 5]. Моделирование отдельных параметров электроэнцефалосигналов (ЭЭС) (частоты следования, амплитуды, фазы) часто не оправдывает надежд физиологов. Это объясняется прежде всего тем, что целостные электрофизиологические процессы головного мозга оцениваются локальными биоэлектрическими явлениями. Комплексный кибернетический анализ изучает множества ЭЭС-отведений, но каждое отведение исследуется автономно, изолированно друг от друга, либо в лучшем случае попарно, как при кросс-корреляционном способе.

Системный подход в кибернетическом анализе ЭЭС показывает, что при психофизиологическом воздействии на человека-оператора АСУ и любом целенаправленном афферентном раздражителе образуется иерархия вероятностных систем, а также подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга. Такой подход соответствует теории функциональных систем П. К. Анохина, связанной с отбором систем, имеющих структуры, которые под действием дифференцируемых раздражителей обладают вероятностным характером проявления. Рассматриваются вероятностные направленности структурных, весовых, вариабельных биоэлектрических пространственно-временных компонент головного мозга при различных функциональных состояниях. Это, с одной стороны, позволяет создать предпосылки интегрального анализа церебральных систем, с другой, — выявить специфику иерархии дифференцируемых пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга. В первом случае усовершенствуется методологический инструментарий дифференциальной объективной диагностики, используемой в клинике, в эксперименте, в медико-биологических исследованиях при проектировании сложных эргатических систем, во втором — выявляются специфические особенности, которые могут быть

заложены в основу функционирования самоорганизующихся бионических электронных узлов автоматизированных систем управления и регулирования.

Цель статьи — выявление особенностей дифференцируемых систем совмещенных синхронных связей головного мозга, имеющих диффузный характер структур и вероятностно-вариабельное распределение весов.

Системный анализ межцентральных отношений в коре и подкорковых образованиях не отрицает индивидуального анализа, но при жестких алгоритмах целесообразно применение модели групповой обработки и кибернетического анализа ЭЭС. Это тем более важно, что создается перспектива теоретических исследований ЭЭС в бионическом аспекте. Актуальность проблем неоспорима.

В нормальных условиях под действием целенаправленных раздражителей на фоне случайной тонизации общемозговых диффузных системных отношений формируются системы синхронных и асинхронных связей с вероятным (доминантным) изменением веса.

Активация одних церебральных систем, депрессия других адаптирует и компенсирует неустойчивое биоэнергетическое неравновесие, создает в тот же момент устойчиво-вероятностное неравновесие множества иерархических систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, которые в частном случае одновременно имеют устойчиво-вероятностное равновесие и неравновесие, развивающиеся под действием целенаправленных возмущений (в случае коррегирования гомеостаза) в ту или иную сторону, в любом случае сопровождая основное устойчиво-вероятностное, доминантное неравновесие систем и подсистем связей организма.

Неоднородность перехода от локальности к диффузности структур кибернетически анализируемых систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга, динамическое преобразование «иерархической субординации структур» этих систем и подсистем свидетельствует о том, что нет жестких («проторенных») прямых и обратных афферентно-эфферентных путей, даже если идентичный стимул повторяется.

Локальный и диффузный характеры пространственно-временных организаций простых (асинхронных) и сложных (синхронных) связей головного мозга являются продуктом системы, а не комплекса отдельных точечных или зональных компонент. Другой вопрос, какое место занимает эта система головного мозга по отношению к другим системам и подсистемам.

Условия проявления каждой системы связей головного мозга обусловлены общемозговыми процессами. Поэтому появление доминантной системы или подсистемы связей на любом иерархическом ранге необходимо увязывать с деятельностью целостного мозга. Это позволяет избежать крайностей, сводящих нейро-

физиологические процессы только к целостному либо только к локальному функционированию головного мозга операторов АСУ.

Произведем анализ множеств иерархических доминантных систем совмещенных синхронных связей головного мозга четырехкомпонентных структур по данным 10-секундных ЭЭС-выборки сорока операторов автоматизированных систем управления. Уровень автоматического анализа 5 мкВ проведен по конъюнктивной методике, описанной в работе, которая посвящена эргатическим системам [2]. ЭЭС регистрировалась на 10-канальном электроэнцефалографе французской фирмы «Альвар»*. Функциональные пробы: фон (закрытые глаза), аутоусугестии покоя, фотостимуляции 8 Гц. Операторы АСУ обучены методике саморегуляции психофизиологическими функциями. Результаты апробированы на заседании научного семинара отдела медицинской кибернетики ордена Ленина института кибернетики АН УССР.

Кибернетический анализ множества доминантных систем пространственно-временных совмещенных синхронных связей головного мозга тетраэдных структур показывает, что признаки этих систем, относящиеся к однородному вариационному ряду четвертого иерархического ранга, сохраняют весовую и переменную направленности систем совмещенных синхронных связей предыдущих рангов, выявляют дополнительные пространственно-временные распределения ЭЭС-волн, имеющих диффузный характер.

Математические ожидания кортежа $H_{1,35}^4$ заключены в диапазоне $\sup \mu = 10 - 12$ бит, $\inf \mu = 3$ бит и по сравнению с $H_{6,22}^3$ снижены в 2—2,5 раза, а по сравнению с $H_{1,7}^2$ — в 6—10 раз, т. е. с ростом диффузности структур кибернетически анализируемых систем совмещенных синхронных связей головного мозга весовая интенсивность биоэлектрической активности в целом понижается.

Вес среднеквадратических отклонений кортежа систем совмещенных синхронных связей $H_{1,35}^4$ распределен в диапазоне $\sup \sigma = 17$ бит, $\inf \sigma = 3$ бит и по сравнению с весом систем совмещенных синхронных связей головного мозга предыдущего ранга понижен в 1,5—2 раза (имеются в виду системы синхронных связей $H_{6,22}^3$ головного мозга).

Коэффициенты вариации доминантных систем совмещенных синхронных связей этого иерархического уровня в двоичных единицах измерения (бит): $v_{\text{ср}} = 80 - 130$, $\sup v = 150 - 200$, $\inf v = 70 - 80$. Для $H_{1,22}^3$ вес v за отдельными исключениями не превышает 150, для $H_{1,7}^2$ — 100 бит.

Для кортежа систем совмещенных синхронных связей $H_{1,36}^4$ характерно включение одной или двух лобных зон. Подмноже-

* Устройство для автоматического анализа ЭЭС описано в сб. «Проблемы бионки», вып. 21.

ства систем совмещенных синхронных связей головного мозга этого кортежа ($H_{1,9}^4$, $H_{16,19}^4$) характеризуют пониженную весовую интенсивность правой (D) стороны, $H_{31,36}^4$ — левой (s), $H_{10,15}^4$, $H_{20,31}^4$ — обеих сторон.

Кибернетический анализ систем совмещенных синхронных связей головного мозга, закодированных признаками вариацонного ряда c_8^4 , устанавливает кортежи признаков, которые отличаются оригинальностью распределения весов, характеризующих ЭЭС-выборки.

Вес μ , σ , v доминантных систем пространственно-временных совмещенных синхронных связей $H_{37,70}^4$ приблизительно в 1,5—2 раза выше, чем $H_{1,36}^4$ (среднее математическое ожидание $\mu_{\text{ср}} = 10$ —15 бит, среднее квадратическое ожидание $\sigma_{\text{ср}} = 12$ —22 бит, средний коэффициент вариации $v_{\text{ср}} = 120$ —170 бит). Кортеж систем совмещенных синхронных связей $H_{37,70}^4$ включает в себя структуры с доминированием зон то левой, то правой стороны. Лобные зоны в структурах этих систем совмещенных синхронных связей головного мозга отсутствуют. Исключение составляют подмножества систем кортежа $H_{62,64}^4, H_{66,68}^4$, включающие F_s с попеременным подключением активирующих составляющих o_d , p_d . Эта особенность доказывает наличие билатеральной и фронтально-окципитальной асимметрий весов кибернетически анализируемых систем совмещенных синхронных связей.

Дифференцированный анализ систем совмещенных синхронных связей $H_{1,70}^4$ показывает, что такие системы головного мозга данного кортежа по коэффициенту сравнения k_c среднеквадратических отклонений при различных функциональных состояниях отличаются в 0,5—2,5 раз, т. е. почти так же, как системы совмещенных синхронных связей Головного мозга $H_{1,56}^3$. Дифференциация систем совмещенных синхронных связей головного мозга $H_{1,70}^4$ показывает, что системы совмещенных синхронных связей головного мозга этого кортежа по коэффициенту сравнения k_c коэффициентов вариации при различных функциональных состояниях в среднем отличаются в 1,2—1,5 раза. Для $H_{1,56}^3 k_c$ не превышает 0,8—2 раза. Для $H_{1,28}^2 k_c$ приблизительно того же порядка. Особенность в данном случае заключается в том, что с ростом диффузности структур вес среднеквадратических отклонений и коэффициентов вариации при различных функциональных состояниях стремится к нивелированию асимметрии. Это аргументируется тем, что коэффициенты сравнения, характеризующие распределение веса систем совмещенных синхронных связей обеих сторон, почти уравниваются.

На общей картине структурно взаимосвязанных систем совмещенных синхронных связей головного мозга четко дифференцируется ряд систем.

Система совмещенных синхронных связей $o_d - T_s - o_s$ (H_{59}^4) имеет следующие параметры: $\mu_\phi = 27$ бит, в период аутосуггестии покоя $\mu_n = 13$ бит, ФС 8 Гц — $\mu_{\phi c} = 21$ бит, среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации (бит): $\sigma_\phi = 39,5$, $v_\phi = 149$, $\sigma_n = 24,9$, $v_n = 192$, $\sigma_{\phi c} = 17,6$. Система совмещенных синхронных связей H_{59}^4 дифференцируется по коэффициентам сравнения: $k_c = \sigma_\phi/\sigma_{\phi c} = 2,24$, $k_c = \sigma_n/\sigma_{\phi c} = 1,41$, $k_c = v_n/v_{\phi c} = 2,29$, $k_c = v_\phi/v_{\phi c} = 1,77$. Относительные ошибки, выраженные в двоичной системе измерения (бит): $m_\phi = 11,6$, $m_{\phi c} = 5,3$, $m_n = 7,5$.

Система совмещенных синхронных связей $o_d - T_s - o_s - p_s$ (H_{65}^4) имеет высокие математические ожидания в периоды фона ($\mu_\phi = 22$ бит) и аутосуггестии покоя ($\mu_n = 17$). При ФС 8 Гц связи между «степенями свободы» системы H_{65}^4 становятся более жесткими, так как согласно среднеквадратическим отклонениям ($\sigma_{\phi c} = 14,5$ бит) уменьшается рассеивание весов. При аутосуггестии покоя связи становятся более мягкими, потому что увеличивается σ_n (23,9 бит). Еще больше размягчается жесткость между «степенями свободы» при ЭЭС фона ($\sigma_\phi = 29,9$ бит). Дифференциация системы при различных функциональных состояниях отличается в 1,5—2 раза ($k_c = \sigma_\phi/\sigma_{\phi c} = 2$, $k_c = \sigma_n/\sigma_{\phi c} = 1,63$). В период фона максимальный вес индивидуальных систем совмещенных синхронных связей головного мозга достигает 120 бит. Состояние системы H_{65}^4 характеризуется разбросом коэффициентов вариации в широком диапазоне бит: $v_\phi = 136$, $v_n = 141$, $v_{\phi c} = 77$. Коэффициент вариации в период аутосуггестии покоя в два раза выше, чем при фотостимуляции 8 Гц: $k_c = v_n/v_{\phi c} = 1,83$. Относительные ошибки ограничиваются значениями $m_\phi = 8,5$, $m_{\phi c} = 4,44$ бит.

Отображая плеяду структур s-стороны с центрами коммутационной лабильности пространственно-временного совмещенного синхронизма p_d или o_d , четко дифференцируются по основным вероятностно-статистическим параметрам системы совмещенных синхронных связей $p_d - F_s - T_s - o_s$ (H_{66}^4), $p_d - T_s - o_s - p_s$ (H_{69}^4), $o_d - F_s - o_s - p_s$ (H_{64}^4). Для H_{64}^4 $\sigma_\phi = 18,8$ бит в 2,35 больше, чем при ФС 8 Гц, коэффициент вариации $v_\phi = 171$ бит в 1,71 больше, чем при ФС, коэффициент сравнения $k_c = v_\phi/v_n = 0,99$.

Таким образом, при различных функциональных состояниях операторов АСУ в разной мере проявляется интенсивность билатеральной и фронтально-окипитальной асимметрий со сдвигом максимума синхронной пространственно-временной активности на левую сторону. Кроме того, с ростом диффузности пространственно-временных совмещенных синхронных связей лабильность и расхождение структур уменьшаются, двоякоцентричность синхронных связей нивелируется и вырождается в систему совмещенных синхронных связей левой стороны с возможным под-

ключением правотенной p_d или правотылочной o_d зон. Поэтому, если физиологическим коррелятом функциональных «степеней свободы» «считать вариабельность показателей, характеризующих деятельность систем» [3], то при кибернетическом анализе отбор систем с одинаковыми степенями свободы учитывает вес и структуру. Изменения индивидуально направлены и выражены. При внушении состояния покоя независимо от выраженности ЭЭС наблюдается тенденция к локальности систем смещенных синхронных связей головного мозга.

Структура и вес систем пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга «обеспечивают условия для фиксации и осуществления алгоритмов» [4]. Формирование вероятных алгоритмов систем синхронных и асинхронных связей головного мозга не только не отрицает, но, наоборот, углубляет достоверность корреляционных плеяд в совокупности с признаками, полученными на других уровнях нервной системы.

Использование избыточного количества разнообразных вариабельных признаков систем пространственно-временных организаций синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга, с одной стороны, вуалирует ЭЭС-картину, делает нечеткими результаты распознавания, с другой — выделение признаков систем синхронных и асинхронных связей головного мозга с вероятностной направленностью весов позволяет на фоне стохастического изменения веса систем отобразить основные тенденции, дополняемые общей картиной ЭЭС. Все зависит от того, какую сторону развивать. Нам кажется целесообразным дифференцировать системы синхронных и асинхронных связей головного мозга на фоне маловыраженного разнообразия, не разрушая этого разнообразия.

Несмотря на то что системы синхронных и асинхронных связей головного мозга характеризуются структурой, весом и вариабельностью, они не устанавливают изоморфного (подобного) отношения между исходной и отображенной системами пространственно-временных связей между ЭЭС разных отведений регистрации. Гомоморфное отображение множества ЭЭС делает кибернетический анализ в этом смысле рациональным. Иррационализм, заключенный в формуле «разнообразие уничтожает разнообразие» в пределах отрицается.

Принадлежность множества отображенных доминантных и маловыраженных систем m' пространственно-временных синхронных и асинхронных связей головного мозга к множеству систем M исходного состояния описывается формулой $m' \in M$. Если же подсистема m'' синхронных и асинхронных связей головного мозга не принадлежит множеству M систем синхронных связей головного мозга, то символически отношения между множеством и таким подмножеством систем синхронных и асинхронных связей записывается так: $m'' \notin M$, или $m'' \in \bar{M}$.

Аналогично, когда множество M систем синхронных и асинхронных связей головного мозга входит в состав другого множества M систем связей головного мозга, множество M_1 систем синхронных и асинхронных связей называется подмножеством или частью множества $M: M_1 \subseteq M$, или $M \supseteq M_1$. Множество $M_1 = \{m \in M_1\}$, где m — структурные компоненты систем связей головного мозга. Множеству M_1 систем совмещенных синхронных связей головного мозга октавных структур принадлежат компоненты m , являющиеся четырьмя структурными компонентами систем связей головного мозга.

Учитывая свойства разветвления и сворачивания признаков вариационных рядов c_8^3, c_8^4, c_8^5 , отображающих системы и подсистемы совмещенных синхронных связей головного мозга, и сравнивая множества $M_2 = M_3 = 56$ систем синхронных связей головного мозга структур предыдущего и последующего иерархических рангов, можно записать $M_1 (= 70) > M_2 = M_3 (= 56)$. Количество структурных компонент m_i , соответствующих иерархических систем совмещенных синхронных связей головного мозга подчиняется неравенству $m_2 > m_1 > m_3$. Поэтому системы синхронных связей головного мозга, подчиненные правилу предшествования или следования, образуют упорядоченные множества систем синхронных связей головного мозга. Анализируя $H_{1.56}^3, H_{1.70}^4, H_{1.56}^5$, можно видеть, что они в одном случае образуют множества, в другом (структурном) — подмножества.

Если M' — дополнение множества M систем синхронных связей, то M' включено в M . Отношения включения множеств систем синхронных связей головного мозга характеризуется следующими свойствами: если $A \subseteq b, b \subseteq c$, то $A \subseteq c$; если $A \subseteq b, b \subseteq A$, то $A = b$.

Законы ассоциативности и дистрибутивности конъюнкции и дизъюнкции, используемые при формировании систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, могут быть использованы при пересечении и объединении множеств этих систем связей, применяемых при гомоморфном моделировании. Учитывая вес систем синхронных и асинхронных связей головного мозга, отбираем дифференцируемые системы связей: если $A \in R$, то $\beta(A) \in R$, где $\beta(A)$ — множество всех подмножеств множества x , что иначе называется булеаном x . Поэтому ЭЭС выборки, например трех зон регистрации, формируют мультиплиярную просеквенцию, т. е. конечную последовательность систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга

$$A (= M) \wedge [b (= N) \vee c (= z)] \equiv (M \wedge M) \vee (M \vee z),$$

где M, N, z — отведения ЭЭС с соответствующими колебаниями.

Выявленные нами свойства доказывают эффективность автоматического анализа переменных пространственно-временных организаций потенциалов головного мозга.

Кибернетический анализ ЭЭС качественно повышается в случае параллельной обработки ЭЭС. Достигается это путем вариативного анализа практически необходимого числа отведений, путем использования увеличенной емкости запоминающих устройств. В перспективе открывается возможность многоуровневого сопряжения множества систем и подсистем синхронных и асинхронных связей головного мозга с АСВТ при помощи многополюсового логического устройства.

Использование в медико-биологических приборах вместо магнитоэлектрических и электронных счетчиков оперативных запоминающих устройств на тонкопленочных магнитных сердечниках, цилиндрических тонких пленках, МДП-транзисторах, криогенных и световодных активных элементах, выполненных, например, в виде «кубов», кассет, взаимозаменяемых субблоков, создает в перспективе возможность оперативного считывания, записи и поиска необходимой биологической и медицинской информации в клинических, экспериментальных и производственных условиях. Это расширяет возможности АСУ.

Список литературы: 1. Джордж Ф. Мозг как вычислительная машина. М., ИЛ., 1963. 286 с. 2. Филатев А. Т., Колотенко Г. А., Дохов М. У. Психогигиенические аспекты операторской деятельности в системе человек — машина. — В кн.: Эргонимика на транспорте. Киев, 1975 с. 19—20. 8. Кончалов Г. Е. К оценке разнообразия деятельности систем. — В кн.: XXIV Всесоюз. совещ. по проблемам высшей нервной деятельности, посвящ. 125-летию со дня рождения И. П. Павлова (материалы симпозиумов). М., 1974. 117 с. 4. Дубирный Л. С., Куприна Е. А. Об изменении ЭЭГ ритма человека при внушенных эмоциях и гипнотическом состоянии. — В кн.: XXIV Всесоюз. совещ. по проблемам высш. нервной деятельности, посвящ. 125-летию со дня рождения И. И. Павлова (материалы секционных заседаний). М., 1974, с. 111—112.

УДК 681.015.24

В. Ф. ШОСТАК, канд. техн. наук

Харьковский институт радиоэлектроники

Г. Н. ПЕТРОВ

Харьковский филиал опытно-конструкторского бюро автоматикки

МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧАХ РАЗРАБОТКИ (КОНСТРУИРОВАНИЯ) ОПТИМАЛЬНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Большинство методов оптимального управления с помощью ЦВМ предполагает наличие математического описания управляемых объектов.

Описание объекта может быть составлено с различной степенью полноты, которая характеризует подробность и уровень описания. Уровень описания определяется множествами вход-

ных переменных $\bar{X} = \{X_i\}$, возмущающих $\bar{Z} = \{Z_i\}$, управляющих воздействиях $\bar{M} = \{M_i\}$, выходных переменных $\bar{y} = \{y_i\}$, постоянных коэффициентов $\bar{\alpha} = \{\alpha_i\}$ и структурой их взаимосвязей f .

Для i -й управляемой подсистемы начальный и k -й уровни описания определяются следующими выражениями:

$$\bar{Y}_i^{(0)} = f_i^{(0)}(\bar{X}_i^{(0)}, \bar{Z}_i^{(0)}, \bar{M}_i^{(0)}, \bar{\alpha}_i^{(0)}); \quad \bar{Y}_i^{(k)} = f_i^{(k)}(\bar{X}_i^{(k)}, \bar{Z}_i^{(k)}, \bar{M}_i^{(k)}, \bar{\alpha}_i^{(k)}), \quad (1)$$

где $\bar{Y}_i^{(0)} \subset \bar{Y}_i^{(k)} \subset \bar{Y}_i$, $\bar{X}_i^{(0)} \subset \bar{X}_i^{(k)} \subset \bar{X}_i$, $\bar{Z}_i^{(0)} \subset \bar{Z}_i^{(k)} \subset \bar{Z}_i$, $\bar{M}_i^{(0)} \subset \bar{M}_i^{(k)} \subset \bar{M}_i$, $\bar{\alpha}_i^{(0)} \subset \bar{\alpha}_i^{(k)} \subset \bar{\alpha}_i$, $i \in I$.

Здесь $\bar{Y}_i$, $\bar{X}_i$, $\bar{Z}_i$, $\bar{M}_i$, $\bar{\alpha}_i$ — полные множества переменных и коэффициентов, адекватно описывающих процесс в подсистеме P_i .

Пусть процесс описывается полиномом Колмогорова — Габора:

$$y = \alpha_0 + \sum_{n1=1}^N \alpha_{n1} x_{n1} + \sum_{n1=1}^N \sum_{n2=1}^N \alpha_{n1} \alpha_{n2} x_{n1} x_{n2} + \\ + \sum_{n1=1}^N \sum_{n2=1}^N \sum_{n3=1}^N \alpha_{n1} \alpha_{n2} \alpha_{n3} x_{n1} x_{n2} x_{n3} + \dots \quad (2)$$

Здесь $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}$; $\bar{Z} = \{x_{l+1}, x_{l+2}, \dots, x_r\}$; $\bar{M} = \{x_{r+1}, x_{r+2}, \dots, x_N\}$.

Начальный уровень описания может быть представлен первыми членами полинома

$$y^{(0)} = \alpha_0 + \sum_{n1=1}^R \alpha_{n1} x_{n1}, \quad R \subset N. \quad (3)$$

Процесс формирования новых уровней описания состоит в последовательном изменении вида членов полинома и их количества. При этом уровень описания подсистемы необходимо изменять в сторону увеличения эффекта от ее функционирования по системному критерию работы [1]:

$$\varphi_{0i}^{(k)}(t) = {}^{(1)}\bar{Y}_{0i}^{(k)} \bar{\Pi}_{yi} - {}^{(1)}\bar{X}_i^{(k)} \bar{\Pi}_{xi} - {}^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)} \bar{\Pi}_{zi} - {}^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)} \bar{\Pi}_{mi} - \varphi_{in}^{(k)} - V_{in}^{(k)}, \\ {}^{(1)}\bar{Y}_{0i}^{(k)} \subset \bar{Y}_{0i}^{(k)}, \quad {}^{(1)}\bar{X}_i^{(k)} \subset \bar{X}_i^{(k)}, \quad {}^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)} \subset \bar{Z}_i^{(k)}, \quad {}^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)} \subset \bar{M}_{0i}^{(k)}, \quad (4)$$

где ${}^{(1)}\bar{X}_i^{(k)}$, ${}^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)}$, ${}^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)}$, ${}^{(1)}\bar{Y}_{0i}^{(k)}$ — составляющие векторов потоков, входящих и выходящих из подсистемы, которые используются для формирования целевой функции; $\bar{\Pi}_i$ — вектор весовых коэффициентов, учитывающих стоимости входных и выходных потоков; $V_{in}^{(k)}$, $\varphi_{in}^{(k)}$ — соответственно затраты на создание k -го уровня описания и амортизацию, обслуживание подсистемы, приведенные к периоду времени, на котором вычисляется значение $\varphi_{0i}^{(k)}$. Индекс нуль присвоен оптимальным значениям векторов управляющих и выходных потоков.

В процессе функционирования системы изменяются векторы $^{(1)}\bar{\alpha}_i^{(k)}(t)$, $^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)}(t)$, что приводит к необходимости поиска новых значений управляющих воздействий, оптимизирующих критерий (4). При этом значение вектора $^{(1)}\bar{X}_i^{(k)}$ будем считать заданным.

Из уравнения (4) с учетом выражения (1) следует

$$^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)} [^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)}(t), ^{(1)}\bar{\alpha}_i^{(k)}(t)], \\ ^{(1)}\bar{Y}_{0i}^{(k)} [^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)} (^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)}(t), ^{(1)}\bar{\alpha}_i^{(k)}(t)), ^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)}(t), ^{(1)}\bar{\alpha}_i^{(k)}(t)].$$

Затраты на создание описания зависят от его сложности, поэтому с учетом (1) можно записать

$$V_{in}^{(k)} = V (^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)}(t), ^{(1)}\bar{\alpha}_i^{(k)}(t)).$$

Так как векторы $\bar{\alpha}_i(t)$, $\bar{Z}_i(t)$ обычно изменяются случайным образом, значение критерия (4) необходимо усреднять на множестве дискретных значений J , полученных путем квантования по уровню векторов $^{(1)}\bar{\alpha}_i^{(k)}$, $^{(1)}\bar{Z}_i^{(k)}$, или на множестве их непрерывных значений [2].

Для упрощения операции усреднения линеаризуем функцию (4) разложением в ряд Тейлора в точках m_z , m_a [3]:

$$\begin{aligned} \varphi_{0i}^{(k)}(t) \approx & ^{(1)}\bar{Y}_{0i}^{(k)} [^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)}(\bar{m}_z, \bar{m}_a, t)] \bar{\Pi}_{yi} - \\ & - ^{(1)}\bar{X}_i^{(k)} \bar{\Pi}_{xi} - \bar{m}_z^{(k)}(t) \bar{\Pi}_{zi} - ^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)}(\bar{m}_z, \bar{m}_a, t) \bar{\Pi}_{ui} - \varphi_{in}^{(k)} - \\ & - V_{in}^{(k)}(\bar{m}_z, \bar{m}_a, t) + \sum_{q=1}^Q \frac{\partial \varphi_{0i}^{(k)}}{\partial m_{zq}} Z_q^0 + \sum_{\beta=1}^B \frac{\partial \varphi_{0i}^{(k)}}{\partial m_{a\beta}} \alpha_{\beta}^0, \end{aligned} \quad (5)$$

где m_z , m_a — математические ожидания возмущающих воздействий Z и коэффициентов α ; Z_q^0 , α_{β}^0 — центрированные случайные значения Z , α .

Возьмем от обеих частей выражения (5) математическое ожидание

$$\begin{aligned} m_{\varphi_{0i}}^{(k)}(t) = & ^{(1)}\bar{Y}_{0i}^{(k)} [^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)}(\bar{m}_z, \bar{m}_a, t)] \bar{\Pi}_{yi} - ^{(1)}\bar{X}_i^{(k)} \bar{\Pi}_{xi} - \bar{m}_z(t) \bar{\Pi}_{zi} - \\ & - ^{(1)}\bar{M}_{0i}^{(k)}(\bar{m}_z, \bar{m}_a, t) \bar{\Pi}_{ui} - \varphi_{in}^{(k)} - V_{in}^{(k)}(\bar{m}_z, \bar{m}_a, t). \end{aligned} \quad (6)$$

В реальной системе управления время ЦВМ распределяется на решение различных задач, поэтому задачи оптимального управления решаются с некоторым периодом τ_1 , который определяется циклом и временем решения задач оптимизации.

Вследствие изменения вектора $\bar{Z}(t)$ за период τ_1 происходит отклонение критерия φ системы от оптимального значения, что приводит к потерям эффективности. Кроме того, в процессе эксплуатации системы изменяются параметры управляемого объекта и, следовательно, нарушается адекватность математического описания $\bar{Y}(\bar{M}, \bar{Z}, \bar{X}, \bar{\alpha})$, используемого при решении

задач оптимизации. Это приводит к дополнительным потерям эффективности за время τ_2 (период идентификации объекта).

С учетом сказанного выражение для критерия (4) можно записать в виде

$$\varphi_{\text{ср0i}}^{(k)} = \frac{1}{N_\tau} \sum_{l_2=1}^{N_\tau} \frac{1}{n_\tau} \sum_{l_1=1}^{N_\tau} \frac{1}{\tau_{10}} \int_0^{t+\tau_{10}} m\varphi_{0i,l_1}^{(k)}(t) dt, \quad (7)$$

$$\text{где } m\varphi_{0i,l_1}^{(k)}(t) = {}^{(1)}\bar{Y}_{0i,l_1}^{(k)} [{}^{(1)}\bar{M}_{0i,l_1}^{(k)}(\bar{m}_{z,l_1}^{(k)}, \bar{m}_{z,l_2}^{(k)}, t), \bar{m}_{z,l_1}^{(k)}, \bar{m}_{z,l_2}^{(k)}, {}^{(1)}\bar{X}_i^{(k)}] \bar{\Pi}_{yi} - {}^{(1)}\bar{X}_i^{(k)} \bar{\Pi}_{xi} - \bar{m}_{z,l_1}^{(k)}(t) \bar{\Pi}_{zi} - {}^{(1)}\bar{M}_{0i,l_1}^{(k)}(\bar{m}_{z,l_1}^{(k)}, \bar{m}_{z,l_2}^{(k)},$$

$t) \bar{\Pi}_{mi} - \varphi_{in}^{(k)} - V_{in}^{(k)}(\bar{m}_{z,l_1}^{(k)}, \bar{m}_{z,l_2}^{(k)}, t)$ — математическое ожидание критерия эффективности i -й подсистемы на l_2 -м периоде идентификации, на l_1 -м периоде принятия решения; T — время функционирования системы управления; τ_{10} , τ_{20} — соответственно оптимальный период принятия решения и идентификации по критерию (7),

$$\tau_{10} = \tau_{10}(\bar{m}_z^{(k)}, m_z^{(k)}), \tau_{20} = \tau_{20}(\bar{m}_z^{(k)}, \bar{m}_z^{(k)});$$

n_τ — количество циклов принятия решения за период идентификации, $n_\tau = \tau_{20}/\tau_{10}$; N_τ — количество циклов идентификации за время функционирования T , $N_\tau = T/\tau_{20}$.

В этом случае оптимальный уровень описания управляемой подсистемы определяется оптимальным вектором управляющих воздействий M_0 , оптимальными периодами принятия решения τ_{10} и идентификации τ_{20} .

В качестве примера рассмотрим подсистему, функция цели которой имеет вид

$$\varphi(t) = (\alpha_{l_1}\psi_1 + \alpha_{l_2}M^2\psi_2 - M\psi_3) - \left(\frac{1}{\tau_1}b_{l_1} + \frac{1}{\tau_2}c_{l_2}\right), \quad (8)$$

где $\psi_1 = Z_{l_1}t^2$, $\psi_2 = 1t$, $\psi_3 = Z_{l_1}t$ — составляющие вектора $\bar{Z}(t)$; $Y_1 = \alpha_{l_1}\psi_1$, $Y_2 = \alpha_{l_2}M^2\psi_2$ — составляющие вектора $\bar{Y}(t)$; b_{l_1} , c_{l_2} — соответственно затраты на оптимизацию и идентификацию подсистемы.

С учетом выражения (6)

$$m_\varphi(t) = (m_{z,l_1}m_{z,l_1}t^2 + m_{z,l_1}M^2t - m_{z,l_1}Mt) - \left(\frac{1}{\tau_1}m_{b,l_1} + \frac{1}{\tau_2}m_{c,l_2}\right). \quad (9)$$

Оптимальное значение управляющего воздействия M_0 найдем путем дифференцирования по M выражения (9):

$$M_0 = m_{z,l_1}/2m_{c,l_2}. \quad (10)$$

Тогда

$$\varphi_{cp0} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_0} \sum_{l=1}^{n_0} \int_0^{\tau_{i0}} \left(m_{a_{l_i}} m_{z_{l_i}} t^2 - \frac{m_{z_{l_i}}^2 t}{4m_{a_{l_i}}} - \frac{1}{\tau_{l_i}} m_{b_{l_i}} - \frac{1}{\tau_{l_i}} m_{c_{l_i}} \right) dt. \quad (11)$$

Пусть $m_{c_{l_i}} = 10 + 0,1t$, $m_{b_{l_i}} = 10 + 80t$, $m_{z_{l_i}} = 0,8t$, $m_{a_{l_i}} = -0,1 - 5t$, $T = 10$.

Приведем оптимальное значение функции цели подсистемы, найденное путем решения уравнения (11) на ЦВМ «Минск-32» (рис. 1): $\varphi_{cp0} = 5499,3$ при $\tau_{20} = 1,6119$, $\tau_{10} = 0,2686$.

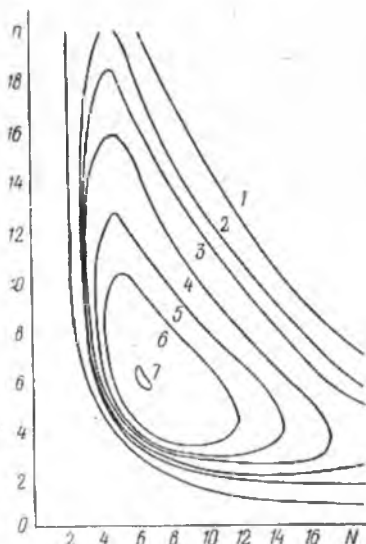
Рассмотрим основные виды затрат, возникающие в процессе поиска оптимального уровня описания (таблица). Перечень затрат дан с учетом работ [4, 5]. Суммарные затраты на поиск k -го уровня описания в соответствии с таблицей запишем в виде суммы единовременных затрат и текущих затрат на поиск оптимального режима и идентификацию подсистемы в процессе эксплуатации:

$$V_i^{(k)} = V_{il}^{(k)} + V_{ir}^{(k)}, \quad (12)$$

где $V_{il}^{(k)} = E_n \sum_{j=1}^8 V_{ij}^{(k)}$ — единовременные затраты; V_{ij} — $j^{\text{н}}$ -вид затрат; E_n — нормативный коэффициент эффективности;

$$\begin{aligned} V_{ir}^{(k)} = & \sum_{j=1}^{N_1} \Pi_{vj} \sum_{l=1}^{L_1} \tau_{lv_{опл}}^{(k)} (\bar{Y}^{(k)}(\bar{\alpha}_l^{(k)})) + \sum_{j=1}^{N_2} \Pi_{vj} \sum_{l=1}^{L_2} \tau_{lv_{узл}}^{(k)} (\bar{Y}^{(k)}(\bar{\alpha}_l^{(k)})) + \\ & + E_n \left(\sum_{j=1}^{N_2} \Pi_{mj} \sum_{l=1}^{L_1} \tilde{m}_{опл}^{(k)} (\bar{Y}^{(k)}(\bar{\alpha}_l^{(k)})) + \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^{N_1} \Pi_{mj} \sum_{l=1}^{L_2} \tilde{m}_{узл}^{(k)} (\bar{Y}^{(k)}(\bar{\alpha}_l^{(k)})) \gamma_{jl} \right) - \end{aligned} \quad (13)$$

текущие затраты; $v_{опл}^{(k)}$, $v_{узл}^{(k)}$ — соответственно количество команд l -го вида, необходимое для выполнения программ оптимизации и идентификации с использованием j -го устройства УВМ; $\tilde{m}_{опл}^{(k)}$, $\tilde{m}_{узл}^{(k)}$ — количество ячеек j -го типа памяти, используемое для вы-



Зависимости оптимальных значений системного критерия от N и n :

- 1 — $\varphi_{cp} = -9800,8$; 2 — $\varphi_{cp} = -8725,4$;
3 — $\varphi_{cp} = -8187,7$; 4 — $\varphi_{cp} = -7650,1$;
5 — $\varphi_{cp} = -7112,4$; 6 — $\varphi_{cp} = -6574,7$;
7 — $\varphi_{cp} = -5499,3$.

полнения l -го вида команды при оптимизации и идентификации подсистемы; τ_l — время выполнения l -й команды; Π_{vj} — стоимость единицы времени использования j -го устройства; Π_{mj} — стоимость одной ячейки j -го типа памяти; γ_{jl} — коэффициент, учитывающий время использования j -го типа памяти для выполнения l -й команды; N_1, N_2 — соответственно количество устройств, используемых для оптимизации и идентификации при эксплуатации системы; L_1, L_2 — количество типов запоминающих устройств и количество видов команд, необходимых для выполнения программ оптимизации и идентификации (эксплуатационной); $\bar{\alpha}_1 \subset \bar{\alpha}$ — вектор параметров, идентифицируемых в процессе эксплуатации.

№ п/п	Вид затрат	Уровень описания подсистемы P_i			
		$\bar{y}_i^{(0)}$	$\bar{y}_i^{(1)}$	$\bar{y}_i^{(k)}$	$\bar{y}_i^{(k)}$
1	Постановка задачи создания описания подсистемы $\bar{y}_i$	$V_{i1}^{(0)}$	—	—	—
2	Изучение и анализ процессов, происходящих в подсистеме	$V_{i2}^{(0)}$	—	—	—
3	Построение исходной модели $\bar{y}_i^{(0)}$ (аналитическое описание подсистемы)	$V_{i3}^{(0)}$	—	—	—
4	Выбор и программирование алгоритма начальной идентификации	$V_{i4}^{(0)}$	—	—	—
5	Выбор и программирование алгоритма эксплуатационной идентификации (адаптации)	$V_{i5}^{(0)}$	—	—	—
6	Выбор алгоритма оптимизации и поиска оптимальных значений $\bar{M}_i^{(0)}, \tau_{i10}^{(0)}, \tau_{i20}^{(0)}$	$V_{i6}^{(0)}$	—	—	—
7	Получение экспериментальных данных на производстве	—	$V_{i7}^{(1)}$	—	$V_{i7}^{(k)}$
8	Конструирование k -го варианта уточненной модели $\bar{y}_i^{(k)}$	—	$V_{i8}^{(1)}$	—	$V_{i8}^{(k)}$
9	Выбор и программирование алгоритмов начальной идентификации	—	$V_{i9}^{(1)}$	—	$V_{i9}^{(k)}$
10	Выбор и программирование алгоритма эксплуатационной идентификации	—	$V_{i10}^{(1)}$	—	$V_{i10}^{(k)}$
11	Выбор алгоритма оптимизации и поиск оптимальных значений $\bar{M}_i^{(k)}, \tau_{i10}^{(k)}, \tau_{i20}^{(k)}$	—	$V_{i11}^{(1)}$	—	$V_{i11}^{(k)}$
12	Поиск оптимального варианта уточненной модели $\bar{y}_i$	—	$V_{i12}^{(1)}$	—	$V_{i12}^{(k)}$

Аналогично определяем затраты на начальную идентификацию (перед пуском системы в эксплуатацию):

$$V_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{N_2} \Pi_{vj} \sum_{l=1}^{L_2} v_{inj,l}^{(k)} (\bar{Y}^{(k)} (\bar{\alpha}_1^{(k)})) +$$

$$+ E_n \left(\sum_{i=1}^{N_s} \Pi_{m_i} \sum_{l=1}^{L_s} \tilde{m}_{иниl}^{(k)} \right) (\bar{Y}^{(k)} (\bar{\alpha}_1^{(k)})). \quad (14)$$

Затраты по п. 1—3, 7—8, 12 могут быть найдены с использованием опытно-статистического метода [6].

В соответствии с изложенным алгоритм поиска оптимальной модели подсистемы можно записать следующим образом.

1. Построение исходной модели $\bar{Y}_i^{(0)}$ (таблица, п. 1—3).
2. Выбор для исходной модели алгоритма начальной идентификации $A_{иниir}^{(0)}$, алгоритма оптимизации $A_{опir}^{(0)}$, алгоритма идентификации при эксплуатации (адаптации) $A_{изir}^{(0)}$.
3. Определение ресурсов (объема памяти $\tilde{m}_i^{(0)}$ и машинного времени $\nu_i^{(0)}$), необходимых для реализации алгоритмов.
4. Проверка условия

$$\tilde{m}_i^{(0)} \leq m_{i3}, \quad \nu_i^{(0)} \leq \nu_{i3}, \quad (15)$$

где m_{i3} , ν_{i3} — соответственно объем памяти и количество машинного времени, отпущенные для реализации алгоритмов п. 2. Если условие (15) выполняется, переходим к п. 5, в противном случае — к п. 2.

5. Конструирование k -го варианта уточненной модели $\bar{Y}_i^{(k)}$ (таблица, п. 7, 8).

6. Выбор алгоритмов $A_{иниir}^{(k)}$, $A_{опir}^{(k)}$, $A_{изir}^{(k)}$.

7. Определение ресурсов $\tilde{m}_i^{(k)}$, $\nu_i^{(k)}$.

8. Проверка условия

$$\tilde{m}_i^{(k)} \leq \tilde{m}_{i3}, \quad \nu_i^{(k)} \leq \nu_{i3}. \quad (16)$$

Если условие (16) выполняется, переходим к п. 9, в противном случае — к п. 6.

9. Находим $\max_{\bar{M}} \varphi_{ср0i}^{(k)}$ и проверяем условие

$$|\varphi_{ср0i}^{(k)} - \varphi_{ср0i}^{(k-1)}| \leq \varepsilon_\varphi. \quad (17)$$

Если условие (17) выполняется, то найден оптимальный вариант модели $\bar{Y}_i$. При этом одновременно находим оптимальный период идентификации τ_{20} и оптимизации τ_{10} . Если условие (17) не выполняется, переходим к п. 5.

Предложенная методика позволяет автоматизировать и ускорить процесс поиска оптимальной модели по критерию эффективности, учитывающему потери и затраты.

Список литературы: 1. Ностак В. Ф., Петров Г. Н. Системный подход в задачах идентификации сложных объектов непрерывного типа. — В кн.: Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Вып. 38. Харьков,

1976, с. 36—41. 2. Шостак В. Ф. Об информационной оценке сложности иерархических структур сложных систем управления.— В кн.: Информационные методы в системах управления, измерений и контроля. Т. 1. Владивосток, 1972, с. 225—234. 3. Пугачев В. С., Казаков И. Е., Евланов Л. Г. Основы статистической теории автоматических систем. М., «Машиностроение», 1974. 400 с. 4. Математическое моделирование химических производств. М., «Мир», 1973. 392 с. Авт.: К. Кроу А. Гамилец, Т. Хоффман и др. 5. Мартин Ф. Моделирование на вычислительных машинах. М., «Сов. радио», 1972. 288 с. 6. Беклешов В. К., Завалин П. Н. Нормирование труда в НИИ и КБ. М., «Экономика», 1973. 206 с.

УДК 681.3.06

Г. А. ЯЦЕНКО

Харьковский институт радиоэлектроники

АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОПЕРАТОРОВ ИЗ ИНФИКСНОЙ В ПОЛНОСКОБОЧНУЮ ФОРМУ ЗАПИСИ

При системном проектировании ЭВМ синтез органически сочетается с построением ее внутреннего языка, так как структуры процессоров проектируемых ЭВМ определяются их внутренним языком. Последний отражает класс задач, для решения которых проектируется ЭВМ. Наиболее высокой может быть обеспечена эффективность (в смысле оптимизации характеристик ЭВМ) внутреннего языка специализированной ЭВМ, для которой заданы алгоритмы решаемых задач.

Чтобы построить внутренний язык ЭВМ, необходимо произвести анализ математических операторов в заданных алгоритмах. Существует метод анализа математических операторов, использующий в качестве исходной полноскобочную форму записи этих операторов [1].

В статье предлагается алгоритм преобразования инфиксной [1] формы записи математических операторов, без логических операций, в полноскобочную форму записи. Алгоритм представлен в виде двухленточной машины Тьюринга с тремя читающими головками (просмотровыми объективами) и одной записывающей.

Обозначения: $I \approx \{i/i — натуральные числа\}$ — индексное множество; $B \approx \{b_i/b_1 = +, -, b_2 = x, /, \div, b_3 = \uparrow\}$ — множество символов арифметических операций; $A \approx \{a_i/a_i \in I\}$ — множество операндов; $D = \{d_i/d_1 = (, d_2 =)\}$ — множество символов скобок; X -строка — математический оператор, образованный из элементов множеств A, B, D и записанный в инфиксной форме на алгоритмическом языке высокого уровня, например АЛГОЛ-60; Z -строка — математический оператор в полноскобочной форме записи; $C \approx \{c_i/c_1 = +, -, c_2 = x, /, \div, c_3 = \uparrow\}$ — множество символов операций Z -строки; терм — два операнда, связанные бинарным отношением и заключенные в скобки (операнды в терме могут представлять собой термы); терм считается открытым с момента

записи в Z -строку его правой скобки, до записи левой скобки; r — число открытых термов Z -строки; q_r — число термов Z -строки, открываемых в пределах r -го терма X -строки; $n, v, t, m \in I$, $0 < v < m$, $0 \leq n < (t - m)$; t — первый слева символ операции или квадратной скобки, просматриваемый третьим объективом; i_t — подстрочный индекс символа $t \in C$; i^m — подстрочный индекс m -й справа операции, просматриваемой вторым объективом; $\bar{T}$ — перемещение первого объектива на один символ влево; кванторы: $\forall(v)$: — «для всех v », $\exists(v)$: — «существует v ».

Примечание. Введенное понятие «терм» отличается от аналогичного термина работы [2] тем, что не включает в себя переменные, не связанные n -м отношением ($n > 1$).

Алгоритм преобразования X -строки в Z -строку. На первой ленте машины Тьюринга записана X -строка, на второй — формируется Z -строка. Первые два просмотровых объектива двигаются справа налево по X -строке, третий объектив и записывающая головка — по Z -строке. Первый объектив имеет поле зрения T в один символ X -строки, второй — просматривает влево, начиная с T , одновременно все символы открытого терма, третий — одновременно все символы в пределах открытого терма, не содержащего других открытых термов. Закрытые термы воспринимаются вторым и третьим объективами как операнды.

В зависимости от символов, просматриваемых объективами, в Z -строку последовательно справа налево записывается один или несколько символов, определяемых набором правил. Каждое правило (секвенция) включает в себя антецедент (левая часть) — совокупность условий — и консеквент (правую часть) — набор символов, записываемых в Z -строку при истинности антецедента (таблица). Здесь же приведены соответствующие служебные действия.

При использовании системы правил необходимо иметь в виду следующее.

1. Каждое правило, читается: «Если выполняется условие . . . , то в Z -строку записываются символы . . . и выполняется служебное действие . . . ».

2. Приложимость правил к символам, просматриваемым объективами, проверяется последовательно, начиная с первого, с переходом от двенадцатого правила к первому. Исключение составляет седьмое правило, после выполнения которого проверка приложимости производится, начиная с этого же правила.

В «формированной Z -строке все квадратные скобки заменяются круглыми.

Пример. X -строка вида $(a \uparrow b \times (c - d) / d \uparrow \{c \uparrow b - e \times a - b)$ преобразуется в Z -строку путем последовательного применения следующих правил (таблица): 10, 6, 11, 2, 6, 11, 6, 7, 11, 1, 6, 11, 3, 6, 11, 6, 7, 7, 11, 3, 1, 6, 11, 6, 9, 11, 6, 7, 7, 11, 6, 7, 7, 11, 6, 8, 9, 12. Величины r, q_r принимают

последовательно такие значения: $r = 1, q_1 = 2, q_1 = 1, q_1 = 4, q_1 = 5, q_1 = 4, q_1 = 3, q_1 = 4, r = 2, r = 1, q_1 = 3, q_1 = 0, r = 0$.

№ пря вилы	Секвенции		Служебные действия
	Антецедент	Консеквент	
1	$\forall (v, n) : \exists (m, l) : (i^1 > i_l) \wedge (i^v > i^{m+n} > i^l)$	)))	$q_r := q_r + 3$
2	$\forall (v) : \exists (m) : (i^1 > i_l) \wedge (i^v > i^m)$	))	$q_r := q_r + 2$
3	$i^1 > i_l$	)	$q_r := q_r + 1$
4	$\forall (v, n) : \exists (m, l) : (i^v > i^{m+n} > i^l) \wedge (l = 1)$	))	$q_r := q_r + 2$
5	$\forall (v) : \exists (m) : (i^v > i^m) \wedge (l = 1)$	)	$q_r := q_r + 1$
6	$T \in A$	T	$\overrightarrow{T}$
7	$(i^1 < i_l) \wedge (q_r > 0)$	(	$q_r := q_r - 1$
8	$(T = d_1) \wedge (q_r > 0)$	$(\dots ($ q_r	$q_r := 0$
9	$T = d_1$	[	$r := r - 1, \overleftarrow{T}$
10	$T = d_2$	]	$r := r + 1, \overleftarrow{T}$
11	$T \in B$	T	$\overleftarrow{T}$
12	$T = \emptyset$	$\emptyset$	СТОП

В результате преобразования сформируется Z-строка $[(a + ((b \times (c - d)) / ((a \uparrow c) \uparrow b))) - (e \times a)) - b]$, которая после замены квадратных скобок на круглые принимает вид $((a + ((b \times (c - d)) / ((a \uparrow c) \uparrow b))) - (e \times a)) - b]$.

Итак, алгоритм преобразования форм записи математических операторов построен с учетом минимизации его сложности. В нем минимально количество проходов преобразуемых строк и реализованы последовательно запись формируемых строк без необходимости их повторных просмотров и дописываний. Идея, заложенная в предлагаемом алгоритме, может быть использована не только при построении алгоритмов преобразования математических операторов без логических операций, но и в случае использования пропозициональных функций и других выражений, записанных на языках различных уровней.

Список литературы: 1. Берзтисс А. Т. Структуры данных. М., «Статистика», 1974. 408 с. 2. Клини С. К. Математическая логика. М., «Мир», 1973. 408 с.

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ
ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ МАТЕРИАЛЬНЫХ
И ТЕПЛОВЫХ БАЛАНСОВ НЕКОТОРЫХ ПРОИЗВОДСТВ
ОСНОВНОЙ ХИМИИ**

Расчеты материальных балансов — основной этап в проектировании любого производства, по результатам которого принимаются основные проектные решения. Это видно из анализа рис. 1, показывающего современную структуру технологического проектирования на примере химического производства и процесс принятия решений после расчета МТБ. Ручной расчет сложных систем длится 2-3 месяца. Такие продолжительные сроки не дают возможности сопоставить несколько вариантов технологических схем, т. е. практически исключают многовариантное проектирование. В процессе расчета используется несколько сотен переменных, многие из которых задаются волевым порядком. Такой подход исключает возможность оптимизации решений. При сравнении вариантов в этих условиях преобладает опыт отдельных специалистов, т. е. присутствует субъективизм в принятии решений. В связи с этим большое значение в проектировании приобретают автоматизированные способы расчета и оптимизации.

Выполнено много работ, доказавших возможность использования ЭВМ для проектирования решения инженерных и организационно-экономических задач. Решена общая постановка проблем и методов системного проектирования химических производств [1]. Делаются попытки перейти от использования ЭВМ для решения локальных задач в области проектирования к созданию автоматизированных систем, в основу которых положены принципы оптимизации самого процесса проектирования.

Известны различные принципы создания программ для расчетов МТБ [1—8]. Некоторые программы, построенные на этих принципах, уже функционируют. Однако широкое их использование ограничено несоблюдением требований, предлагаемых проектировщиками.

В статье рассматриваются принципы построения основного фрагмента системы автоматизированного проектирования (САПр) химических предприятий — универсальной программы для расчета материальных и тепловых балансов химико-технологических систем (ХТС). Место и назначение фрагмента МТБ в САПре известно [1], поэтому перейдем к общим положениям и цели разработки фрагмента.

Фрагмент автоматизированного расчета МТБ ХТС представляет собой единую кибернетическую систему человек — ЭВМ и должен

функционировать как человеко-машинная система, в которую входят экономико-математические методы, средства вычислительной техники, единое справочно-информационное обеспечение. Данная система позволяет разным функциональным группам проектировщиков принимать оптимальное решение в условиях единой автоматизированной системы проектирования. Во фрагменте происходят подготовка, обработка и анализ информации. В принятии окончательного решения предусматривается обязательное участие проектировщика.

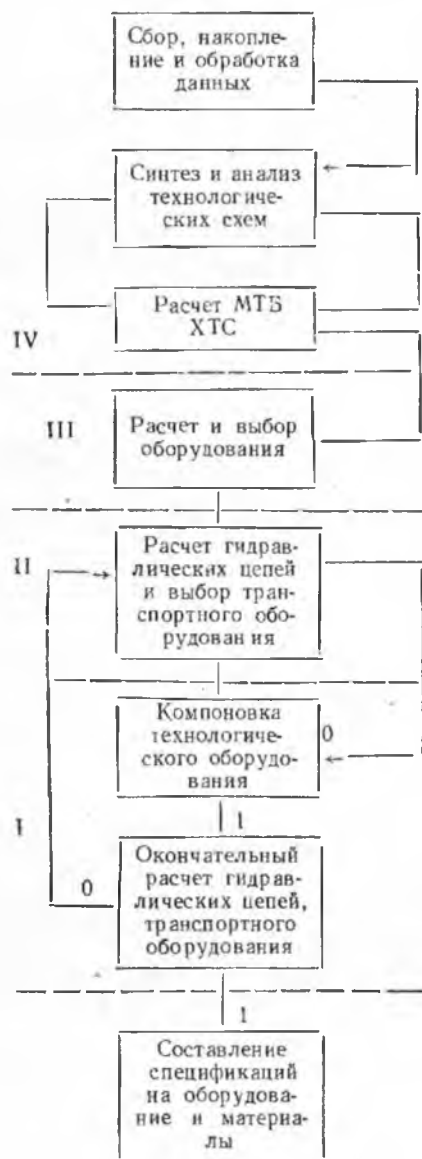


Рис. 1. Стадии технологического проектирования.

Основная цель разработки и внедрения фрагмента — сокращение сроков проектирования, достижение высокого технического уровня и высокой экономической эффективности проектируемых технологических процессов и производств при автоматизации расчетов сложных технологических схем и их оптимизации с использованием развитых комплексов программ. Это достигается путем

а) создания унифицированных расчетов моделей на всех уровнях иерархии химических производств;

б) разработки развитого справочно-информационного фонда автоматизированного проектирования, включающего библиотеки констант физико-химических свойств, данные по кинетике, справочные данные об оборудовании, материалах и изделиях, используемых в проектах химических заводов, а также данные о нормах и правилах проектирования объектов;

в) многовариантного проектирования структур ХТС и выбора оптимальной.

Указанная цель разработки фрагмента системы достигается комплексными расчетами на ЭВМ материальных и тепловых балансов, оптимизацией структур и блоков ХТС. Разработка подсистемы должна выполняться с учетом разнотипного оборудования, различных процессов химической технологии, большого количества жидкостных и газовых потоков с многокомпонентным составом и различными фазовыми состояниями компонентов при различных ограничениях на параметры жидкостных и газовых потоков.

Автоматизированный фрагмент расчетов МТБ ХТС с точки зрения его функционирования решает три основные задачи: подготовку исходных данных для расчета и оптимизации объекта, переработку данных (расчеты) и выдачу требуемой выходной информации. В этом случае автоматизируем вторую и третью задачи как наиболее трудоемкие и кропотливые. В основе разработки и функционирования фрагмента должны лежать системный подход и модульность. Применение системного подхода к созданию расчетных программ различных классов производств приобретает большое значение, так как к химическим производствам относятся технологические процессы со сложнейшим реакционным оборудованием, производства различных солей, удобрений, наполнителей, включающих в себя всевозможные газовые и жидкостные потоки. Необходимо стремиться создавать расчетные программы — модули ХТС, максимально охватывающие различные классы производств. Для оценки ХТС в условиях оптимального проектирования должны выводиться различные критерии, в связи с чем системный подход к систематизации их приобретает решающее значение.

В условиях функционирования данного фрагмента как кибернетической системы человек — ЭВМ системный подход при проектировании ХТС определяет процессы синтеза, анализа и выбора оптимальных решений. При ручных способах расчета и проектирования ХТС осуществление названных процессов целиком возлагается на проектировщика. После создания подсистемы автоматизированного расчета МТБ ХТС функции перераспределяются между проектировщиками и ЭВМ. В данном случае за проектировщиком как основной процесс остается синтез ХТС (задание вариантов ее топологии, характеристик процессов, ограничений или конкретных значений параметров жидкостных и газовых потоков). При помощи ЭВМ согласно выбранным критериям производятся расчет ХТС, выбор наилучшего варианта ХТС в случае многовариантности, распечатка выходной информации, оптимизируются технологические режимы. За проектировщиком остается функция анализа отобранного варианта ЭВМ с последующими уточнениями, добавлениями или принятием за основу для дальнейшего проектирования.

В основе разработки фрагмента должна лежать также модульность, т. е. возможность функционирования значительного количества различных расчетных программ. Под модулем будем

понимать отдельную программу, алгоритм которой представляет собой математическую модель отдельного процесса или производства. Для проведения расчета при необходимости вызываются



Рис. 2. Структурно-функциональная схема автоматизированного фрагмента расчетов МТБ ХТС.

отдельные программы-модули. Фрагмент САПра автоматизированных расчетов МТБ ХТС должен состоять из обслуживающей базы и функциональной части (рис. 2). Обслуживающая база — комплекс структурных блоков подсистемы, содержащих вспомогательные исходные данные для обеспечения производств расче-

тов, необходимое количество расчетных программ, систему документооборота и массивов информации, обеспечивающих решение поставленных задач.

Обслуживающая база включает в себя справочно-информационный фонд — совокупность данных, используемых в подсистеме, массивов информации и методов их организации, обращений к ним и выдачи нужных показателей в зависимости от требований расчетных программ, а также обеспечивающих решение необходимого комплекса задач в соответствии с их назначением. В справочно-информационный фонд подсистемы входят библиотеки физико-химических свойств веществ с банками данных и расчетными подпрограммами физико-химических свойств веществ (расчет плотностей, теплоемкостей), символика проектируемого оборудования, типовые схемы обвязок оборудования. В справочно-информационный фонд входят справочное и информационное обеспечения подсистемы. Справочное обеспечение состоит из внутреннего и внешнего и включает в себя необходимые справочные данные о фазовых равновесиях, кинетике, физико-химических свойствах. К внутреннему справочному обеспечению относятся собственно библиотеки по перечисленным ранее свойствам, а также их расчетные программы, которые хранятся в памяти ЭВМ. Внешнее справочное обеспечение состоит из справочников, каталогов, научных статей и сборников, наполняющих и расширяющих внутреннее справочное обеспечение, оно также служит источником для заполнения входной информации подсистемы.

Информационное обеспечение — совокупность исходных данных и документов, используемых во фрагменте, которые обеспечивают решение комплекса задач системы в целом и на каждом этапе расчета в соответствии с его назначением, а также ряд выходных документов [9]. Информационное обеспечение состоит из входной информации фрагмента, выходной информации фрагмента и различных инструкций по обслуживанию информационного обеспечения. При разработке фрагмента необходимо стремиться к требованию минимизации входной и выходной информации, так как ввод и вывод данных требует много времени при эксплуатации ЭВМ. Минимизация сокращает время ввода и вывода, время заполнения информации, перфорирования, уменьшает вероятность ошибок, повышает надежность системы. Данное требование распространяется также на обмен информацией между подсистемами.

Технические средства фрагмента представляют собой совокупность устройств (ЭВМ, дисплеи, графопостроители, множительная техника), предназначенных для реализации процессов сбора, передачи, обработки, хранения и отображения информации. Технические средства состоят из различных функциональных групп средств.

Группа средств подготовки и первичной обработки данных должна обеспечивать подготовку и контроль исходных данных на машинных носителях и их организацию для ввода в ЭВМ, а также

правильность перфорации на перфокартах и перфолентах. В качестве машинных носителей, кроме перфокарт и перфолемент, используются накопители на магнитных лентах, накопители на магнитных дисках.

Группа средств ввода и вывода данных должна обеспечивать достаточную скорость ввода информации в ЭВМ с перфокарт и перфолемент, достаточную скорость вывода данных из ЭВМ, вывод данных на устройство алфавитно-цифровой печати.

Группа средств обработки данных должна также обеспечивать выполнение вычислительных и логических операций в соответствии с алгоритмом расчета, бесперебойную связь справочного обеспечения с управляющей программой.

Группа средств размножения и оформления документов должна обеспечивать выполнение различных оформительских, машинописных и копировально-множительных работ. Все перечисленные группы располагаются в вычислительном центре.

Математическое обеспечение (МО) — важнейшая структурная единица — включает в себя комплекс экономико-математических, логических методов, расчетных программ решения задач, а также системы МО справочного обеспечения. Математическое обеспечение подсистемы автоматизированного расчета МТБ ХТС состоит из внутреннего и внешнего.

Внутреннее МО поставляется одновременно с техническими средствами. В него входят: операционная система; трансляторы с алгоритмических языков; стандартные, управляющие, обслуживающие программы и блоки; комплекс программ к типовым задачам.

Внешнее МО подсистемы состоит из программ решения конкретных задач: выбора узла графа технологической схемы для расчета; программы выбора метода расчета; библиотеки программ по отдельным производствам; программы для расчета выбранных критериев оптимизации; библиотеки программ справочного обеспечения, включающих в себя программы аппроксимации табличных данных и программ расчета свойств; программы для заполнения выходной информации.

Функциональная часть автоматизированного расчета МТБ ХТС должна обеспечивать наилучшее использование резервов в проектировании ХТС: сокращение сроков обработки информации, повышение экономичности проектирования и его рентабельности. Функциональная часть данной подсистемы состоит из различных функциональных групп.

Группа подготовки и передачи исходных данных на ЭВМ должна обеспечивать качественную подготовку исходных данных для расчета, заполнение входной информации подсистемы о топологии технологической схемы, составах и ограничениях на технологические потоки, а также своевременную передачу входной информации на вычислительный центр. Эта группа входит в состав технологического подразделения предприятия.

Группа подготовки и передачи результатов расчета должна входить в состав вычислительного центра и в требуемые сроки готовить выходную информацию в необходимом объеме в производственные отделы.

Группа оформления и размножения документов обеспечивает тиражирование в нужных количествах и в требуемые сроки выходной информации и универсальной программы в виде проектных документов на множительных машинах.

При разработке собственно универсальной программы автоматизированных расчетов МТБ ХТС необходимо учесть следующее.

Прежде всего следует разработать способ задания топологии ХТС для ввода в ЭВМ [3]. Для изображения иконографических обобщенных моделей ХТС применяется теория графов [10]. В данном случае в качестве иконографической (топологической) модели ХТС принимается изображение в виде потокового графа. Поточковые графы ХТС делят на материальные и тепловые (энергетические). Вершины материального потокового графа ХТС изображают процессы, преобразующие входные параметры потоков в выходные по детерминированным законам, дуги материального потокового графа — массовые расходы потоков с совокупностью концентраций компонентов в потоках, вершины теплового потокового графа — процессы, изменяющие расходы тепла потоков, а также внутренние источники и стоки тепла, дуги теплового потокового графа — общие расходы тепла по потокам. При задании ЭВМ данных о топологии ХТС необходимо выбрать наиболее плотную (занимающую минимальное количество ячеек памяти ЭВМ) информацию об иконографической модели ХТС.

Следует разработать способ задания ЭВМ данных о технологических потоках, составе и наличии компонентов в них, параметрах технологического режима (температура и давление), фазовых состояний компонентов. Необходимо также учитывать различные ограничения в технологических потоках. Здесь рекомендуем способ задания информации в виде матрицы потоков схемы, столбец которой может быть нумерацией дуг графа, а строки — характеристикой компонентов, соответствующей фазовому состоянию и технологическим режимам. Ограничения задаются в виде двух матриц потоков с минимальными и максимальными значениями.

Учитывая многообразие структур различных ХТС и всевозможные требования, предъявляемые к технологическим потокам, можно рекомендовать разработку единой структуры входной информации для ХТС разных классов производств (системы политермического разделения солевых составов и реакционные системы). Это условие отнесем к одному из важных признаков универсальности программы. Единая структура входной информации различных классов производств сравнительно просто решает задачу многовариантного проектирования (рис. 3, блоки 1, 2).

Универсальная программа, анализируя данные в памяти ЭВМ о топологии ХТС и составе потоков, определяет порядок расчета



Рис. 3. Блок-схема универсальной программы расчетов МТВ ХТС.

узлов потокового графа в блоке 5. При разработке блок-схемы универсальной программы принят расчет системы уравнений, описывающей отдельный узел потокового графа. На наш взгляд, такой подход дает ряд следующих преимуществ.

1. Значительно уменьшается размерность решаемой задачи, т. е. поиск оптимального решения в заданных ограничениях.

2. В технологической схеме нет необходимости обязательно выделять рециклы и определять порядок их расчета. Имея в наличии заданные ограничения характеристик рецикла, программа рассчитывает его на входе или выходе соответствующего узла потокового графа. В дальнейшем рассчитанные характеристики рецикла принимаются как исходные данные для последующих расчетов.

3. Учитывая предыдущие два утверждения, можно говорить о создании более простой блок-схемы универсальной программы. Это приводит также к значительной экономии памяти ЭВМ.

К требованию универсальности программы можно отнести автоматическое моделирование процессов МТБ (блок 6). Как указывалось ранее, для изображения топологии ХТС используют потоковые графы, подразумевая под узлами графа определенный базис векторов физико-химических величин технологических потоков, под дугами — собственно потоки.

Следовательно, дуги графа определены на некотором множестве функций, задаваемых узлами, и эти функции описывают некоторое гипотетическое N -мерное векторное пространство над полем скаляров наблюдаемых физико-химических величин. Для преобразования векторных пространств и осуществления операций с векторами и скалярами широко применяется операционное исчисление. Учитывая, что векторные пространства узлов графа и поле скаляров описывают конкретные материальные потоки, можно говорить о применении операционного исчисления для анализа химико-технологических систем [11]. Введем

О п р е д е л е н и е. Пусть материальные потоки некоторой ХТС характеризуются вектором $\bar{f}$ (например, солевым составом, температурами) и пусть этот вектор принимает ряд значений $f_1, f_2, \dots, f_n$, каждому из которых отвечает функция преобразования $\bar{U}_1(t), \bar{U}_2(t), \dots, \bar{U}_n(t)$, где $t = t(f)$ — совокупность координат. Произвольное состояние системы, характеризуемое функцией $\bar{U}(t)$, может быть разложено в ряд функций $\sum_n \bar{U}_n(t)$. Назовем их функ-

циями преобразования параметров потоков ХТС вектора $\bar{f}$. Соответственно множество $\{\bar{f}_n\}$ назовем значениями вектора $\bar{f}$. Для простоты рассмотрения считаем набор значений дискретным. Итак,

$$\bar{U}(t) = \sum_n a_n \bar{U}_n(t); \quad t = t(\bar{f}). \quad (1)$$

Коэффициент a_n введен для случая геометрии гильбертова пространства, которая требует рассмотрения ортонормированных

систем и функций. Система уравнений для расчета материальных балансов ХТС линейно независима, а данное условие выполняется только в конечной ортогональной системе, которая в рассматриваемом нами случае состоит из узлов потокового графа ХТС.

Условие нормировки по (1):

$$\sum_n a_n \bar{U}_n(t) = \begin{cases} \sum_n \bar{U}_n(t) & \text{для } m = n; \\ 0 & \text{для } m \neq n. \end{cases} \quad (2)$$

Предположим также, что функции $U(t)$, $\bar{U}_n(t)$ нормированы на единицу:

$$\int_0^n |\bar{U}_n(t)|^2 dt = 1; \quad \int_0^n |\bar{U}_n(t)|^2 dt = 1, \quad (3)$$

где n — число узлов потокового графа ХТС, а также утверждение, что оператор $\hat{O}$ определен на некотором множестве функций, если указан закон, с помощью которого каждая функция множества сопоставляется с функцией, входящей в то же множество функций. Операторы, определенные на различных множествах функций, что соответствует различным узлам графа, следует рассматривать как различные операторы. Выполнив эти требования, можно ввести операторное уравнение

$$\hat{O} \sum_n \bar{U}_n(t) = \sum_n \bar{f}_n[\bar{U}_n(t)], \quad (4)$$

которое является условием на оператор $\hat{O}$. Строго говоря, следует рассуждать наоборот: задан оператор $\hat{O}$, тогда уравнение (4) является условием для определения функций преобразования $\bar{U}_n(t)$ параметров потоков ХТС оператора $\hat{O}$ применительно ко входным потокам и значениям $\bar{f}$ функций $\bar{U}(t)$ по отношению к выходным потокам. Выражение $\bar{f}_n[\bar{U}_n(t)^n]$ определяет значения параметров выходных потоков по каждому узлу графа. При разработке универсальной программы построен такой оператор, что позволило избежать создания библиотеки процессов.

Дальнейший этап — выбор методов расчета уравнений МТБ. При выдаче исходных данных для расчета проектировщик может задать ограничения и малое количество конкретных значений потоков (чаще всего при проектировании новой ХТС) или достаточное количество данных по потокам (чаще при анализе и оптимизации действующих или реконструируемых ХТС). Анализируя данные в блоке 7, программа назначает безытерационные (блок 8) или итерационные (блок 9) методы расчета. В эти блоки поступают необходимые данные из библиотеки физико-химических свойств веществ (блок (12)).

Окончив расчет ХТС, программа ищет экстремальное значение целевой функции по выбранному критерию оптимальности (блок 14) и выбирает структуру ХТС с экстремальным значением целевой функции (блок 15).

В блоке 16 формируются результаты расчета МТБ для заполнения выходной информации. В задачу данной подпрограммы входит приведение рассчитанных значений к требуемой размерности, необходимые пересчеты исходя из требований заполнения проектной документации. Эти данные поступают в блок 17 для печати выходной информации. Если происходит распечатка выбранной технологической схемы или вычерчивание на графопостроителе, в блок 17 поступают данные из библиотеки символики оборудования (блок 21). Вся выходная информация направляется к проектировщику на окончательный анализ (блок 18). При удовлетворительном выводе начинается заполняться выходная информация для последующего фрагмента САПр «Расчет и выбор аппаратурно-технологической схемы».

В результате анализа могут появиться изменения структурной схемы ХТС, технологических режимов, состава потоков. В этом случае выходная информация поступает на доработку в блок 19 и блоки 1, 2. Процессы расчета и выбора ХТС повторяются.

Такой подход принят при разработке первой редакции универсальной программы моделирования ХТС на основе политехнического разделения солевых систем. Ведутся работы по усовершенствованию программы.

Список литературы: 1. *Зайцев И. Д.* Моделирование процессов автоматизированного химико-технологического проектирования. Л., «Химия», 1976. 185 с. 2. *Островский Г. М., Волин Ю. М.* Методы оптимизации сложных химико-технологических схем. М., «Химия», 1975. 328 с. 3. *Кафаров В. В., Перов В. Л., Мешалкин В. П.* Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М., «Химия», 1974. 344 с. 4. *Липатов Л. Н.* Типовые процессы химической технологии как объекты управления. М., «Химия», 1973. 320 с. 5. *Закгейм А. Ю.* Введение в моделирование химико-технологических процессов. М., «Химия», 1973. 224 с. 6. *Ткач Г. А., Смоляк В. Д.* Моделирование десорбционных процессов содового производства. Л., «Химия», 1973. 208 с. 7. Математическое моделирование химических производств. М., «Мир», 1973. 391 с. Авт.: *К. Кроу, А. Гамилец, Т. Х. Хоффман и др.* 8. *Бондарь А. Г.* Математическое моделирование в химической технологии. К., «Вища школа», 1973. 280 с. 9. Автоматизированные системы управления. Под общ. ред. *В. Т. Шорина*. М., «Знание», 1973. 312 с. 10. *Оре О.* Теория графов. М., «Наука», 1968. 362 с. 11. *Зозуля А. Ф.* Механизация и автоматизация управления. 1976, № 5. 13 с.

УДК 65.012

А. Ф. ЗОЗУЛЯ, Г. Г. АСЕЕВ

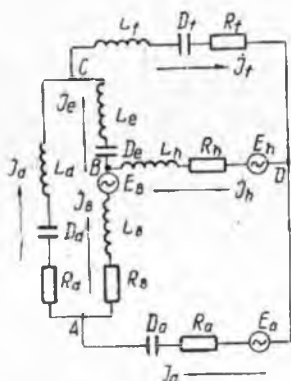
Научно-исследовательский и проектный институт основной химии

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Расчет сложных электрических цепей связан с анализом большого количества линейных и нелинейных уравнений. До настоящего времени безытерационный универсальный метод решения

таких систем отсутствует. В работе сделана попытка применить методы теории графов, в частности двудольные информационные графы (ДИГ), для решения системы линейных и нелинейных уравнений.

В химической технологии ДИГ применяют для выбора свободных и выходных переменных систем уравнений математических моделей химико-технологических систем (ХТС) [1—3]. Основу такого выбора составляют алгоритмы приведения циклической структуры ДИГ к ациклической посредством итерационного разрыва определенных связей с базисными переменными. Такой алгоритм построен на основании анализа матрицы смежности ДИГ. Матрица отражает топологические свойства ДИГ, ветви которого, в свою очередь, отображают связи между уравнениями через информационные переменные, и строится по следующему правилу:



$$\varphi_i x_j = \begin{cases} 1, & \text{если } i - e \text{ ф} - \text{уравнение связано с } j\text{-й } x\text{-переменной;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Рис. 1. Пассивная электрическая цепь.

Матрицу смежности ДИГ можно применить для безытерационного решения системы линейных и нелинейных уравнений,

если информационный граф имеет циклическую структуру, и при условии равенства числа уравнений количеству неизвестных. Число уравнений может быть больше количества неизвестных. Алгоритм построения матрицы смежности легко формализуется и применяется для решения системы уравнений с помощью ЭВМ, что значительно облегчает решение любой совместной системы линейных и нелинейных уравнений. Алгоритм решения основан на том, что при использовании матрицы смежности ДИГ систем уравнений выбирается оптимальный путь решения исключения неизвестных методом Гаусса. Матрица смежности задает оптимальный ациклический граф решения системы.

В качестве примера рассмотрим электрическую цепь, не содержащую активных элементов (рис. 1), где I_i ($i = a, b, d, h, e, f$) — мгновенное значение тока в соответствующей ветви; R_i ($i = a, b, d, h, f$) — активное сопротивление в соответствующей ветви; $D_i = \frac{1}{C_i}$ ($i = a, d, e, f$) — обратная емкость; L_i ($i = b, d, h, e, f$) — индуктивность. Напряжение на отдельных элементах $R_i I_i$; $p L_i I_i$, $\frac{D_i I_i}{p}$, где p , $\frac{1}{p}$ — соответственно дифференцирование и интегрирование по времени. Составим уравнения напряжений

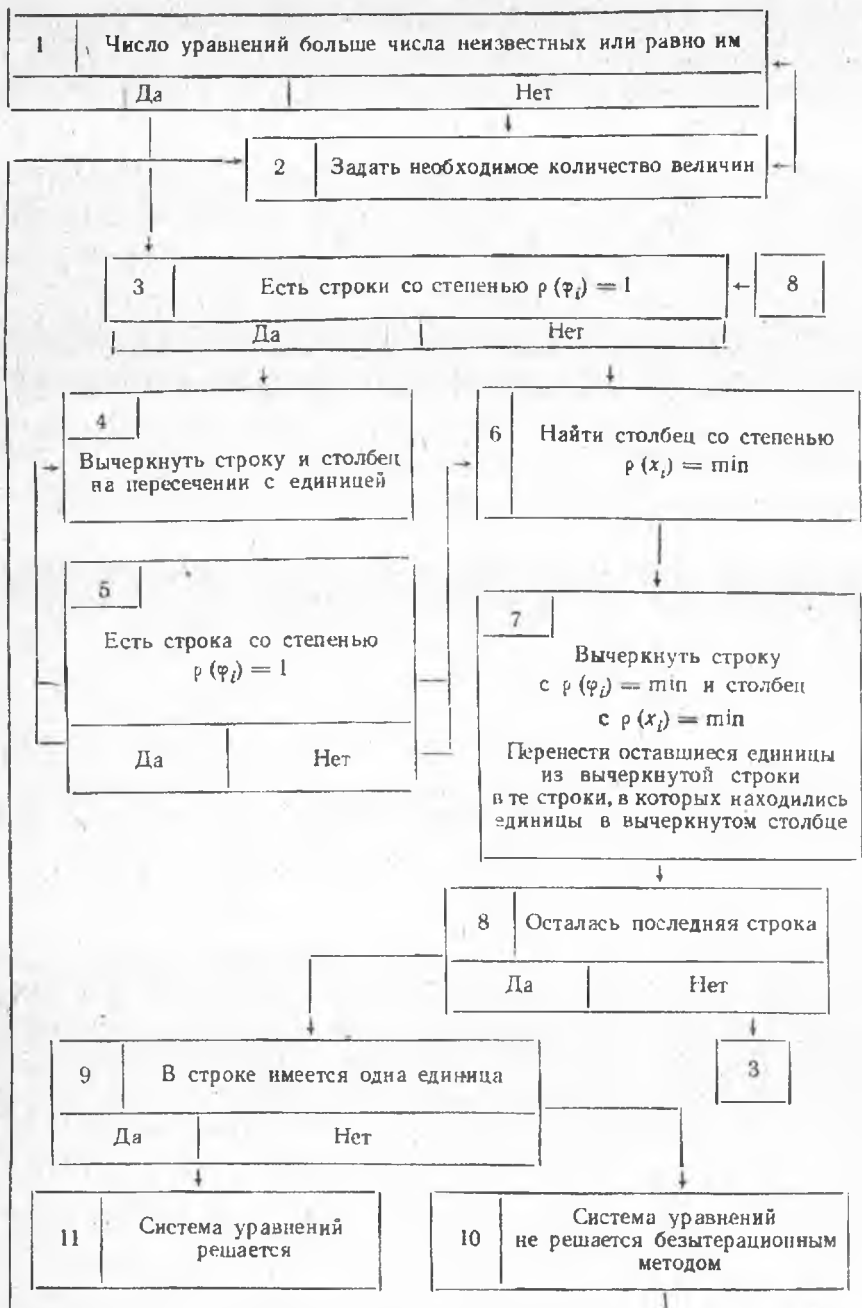


Рис. 2. Алгоритм решения системы линейных и нелинейных уравнений безытерационным методом с анализом матрицы смежности по столбцам.

для каждой ветви пассивной цепи и $N-1$ уравнений токов (где N — число узлов) [4]:

$$\varphi_1 = \left(R_a + \frac{1}{p}D_a\right) I_a - E_a - E_D + E_A = 0;$$

$$\varphi_2 = (R_b + pL_b) I_b - E_b - E_A + E_B = 0; \quad \varphi_3 = (R_h + pL_h) I_h - E_B - E_h + E_D = 0; \quad \varphi_4 = \left(R_d + \frac{1}{p}D_d + pL_d\right) I_d - E_A + E_c = 0;$$

$$\varphi_5 = \left(\frac{1}{p}D_e + pL_e\right) I_e - E_b + E_c = 0; \quad \varphi_6 = \left(R_f + \frac{1}{p}D_f + pL_f\right) I_f - E_c + E_D = 0; \quad \varphi_7 = I_a - I_d - I_b = 0;$$

$$\varphi_8 = I_a - I_h - I_f = 0; \quad \varphi_9 = I_b - I_e - I_h = 0,$$

где $E_i (i = A, B, C, D)$ — напряжения в узлах; $E_j (j = a, b, h)$ — ЭДС генераторов. Математическая модель электрической цепи содержит 9 уравнений и 27 неизвестных. Введем условные обозначения:

$$R_a = X_1; \quad I_b = X_8; \quad E_h = X_{15}; \quad L_e = X_{22}; \quad D_a = X_2; \quad E_b = X_9;$$

$$R_d = X_{16}; \quad I_c = X_{23}; \quad I_a = X_3; \quad E_A = X_{10}; \quad D_d = X_{17}; \quad R_f = X_{24};$$

$$E_a = X_4; \quad E_b = X_{11}; \quad L_d = X_{18}; \quad D_f = X_{25}; \quad E_D = X_5; \quad R_h = X_{12};$$

$$I_d = X_{19}; \quad L_f = X_{26}; \quad R_b = X_6; \quad L_h = X_{13}; \quad E_c = X_{20}; \quad I_f = X_{27};$$

$$L_b = X_7; \quad I_h = X_{14}; \quad D_c = X_{21}.$$

С учетом данных обозначений строим матрицу смежности ДИГ системы уравнений математической модели электрической цепи, в которой звездочкой обозначены известные величины. Считаем, что известны все E_j , R_i , L_i , D_i , E_D . Требуется определить напряжения и токи в ветвях цепи. Как указывалось ранее, необходимое условие получения ациклической структуры информационного графа — равенство числа уравнений числу неизвестных. В отдельных случаях количество уравнений может быть больше их. В данном случае это условие выполняется.

Дальнейшие преобразования производим по алгоритму рис. 2. Предварительно исключим из матрицы смежности столбцы, в которых обозначены заданные величины. Тогда преобразованная матрица смежности будет иметь вид

	X_3	X_8	X_{10}	X_{11}	X_{14}	X_{15}	X_{20}	X_{23}	X_{27}
φ_1	1		1						
φ_2		1	1						
φ_3				1	1				
φ_4			1			1	1		
φ_5				1			1	1	
φ_6							1		1
φ_7	1	1				1			
φ_8	1				1				1
φ_9		1			1			1	

В основу построения ациклического графа решения системы линейных и нелинейных уравнений положен анализ столбцов матрицы смежности ДИГ с предварительным исключением строк

Матрица смежности ДИГ

	X_1^+	X_2^+	X_3^+	X_4^+	X_5^+	X_6^+	X_7^+	X_8^+	X_9^+	X_{10}^+	X_{11}^+	X_{12}^+	X_{13}^+	X_{14}^+	X_{15}^+	X_{16}^+	X_{17}^+	X_{18}^+	X_{19}^+	X_{20}^+	X_{21}^+	X_{22}^+	X_{23}^+	X_{24}^+	X_{25}^+	X_{26}^+	X_{27}^+
φ_1	1																										
φ_2		1																									
φ_3																											
φ_4																											
φ_5																											
φ_6																											
φ_7																											
φ_8																											
φ_9																											

со степенью $p(\varphi_i) = 1$ и столбцов, находящихся на пересечении с данной строкой. Условие блока 3 не выполняется ни для одной строки, поэтому переходим к блоку 6. Например, условие данного блока выполняется для столбца X_{27} . Выполняя условие блока 7, вычеркиваем столбец X_{27} и строку с $p(\varphi_i) = \min$, в данном случае выбираем строку φ_6 . Из строки φ в строку φ_8 переносим 1 в столбце X_{20} , что соответствует подстановке неизвестного X_{20} в уравнение φ_8 , и матрица смежности приобретает следующий вид:

	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{14}	X_{19}	X_{20}	X_{23}
φ_1	1							
φ_2		1		1				
φ_3				1	1			
φ_4			1			1	1	
φ_5				1			1	1
φ_7	1	1				1		
φ_8	1				1		1	
φ_9		1				1	1	1

	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{14}	X_{19}	X_{20}
φ_1	1			1			
φ_2		1		1			
φ_3				1	1		
φ_4			1			1	1
φ_7	1	1				1	
φ_8	1				1		1
φ_9		1			1	1	1

Исходя из условий блоков 6, 7, вычеркиваем столбец X_{23} и строку φ_5 и переносим единицу в столбце X_{11} из строки φ_5 в строку φ_9 .

Вычеркивая столбец X_{19} и строку φ_4 , столбец X_{20} и строку φ_8 , после соответствующего переноса единицы получаем матрицу смежности (см. ниже первую матрицу).

В следующем этапе вычеркиваем столбец X_{14} и строку φ_3 , столбец X_{11} и строку φ_2 (см. ниже вторую матрицу).

Исключая столбец X_8 и строку φ_7 , столбец X_{10} и строку φ_1 , приходим к уравнению с одним неизвестным (третья матрица).

	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{14}
φ_1	1			1	
φ_2		1		1	
φ_3				1	
φ_7	1	1	1		1
φ_9		1		1	1

	X_8	X_9	X_{10}
φ_1	1		1
φ_7	1	1	1
φ_9	1	1	1

	X_8
φ_9	1

Чтобы найти решение всех неизвестных, необходимо осуществить обратный ход по образованному ациклическому графу.

При разработке подробного алгоритма вместо блока 3 можно использовать алгоритм АСП-1, приведенный в работе [2].

Итак, системы линейных и нелинейных уравнений безытерационным методом можно решить посредством построения матрицы смежности ДИГ данной системы и анализа ее по столбцам при соблюдении равенства числа уравнений количеству неизвестных. Оптимальный путь подстановок в методе Гаусса исключением неизвестных задается ациклическим графом, построенным последовательным преобразованием матрицы смежности исходя из циклической структуры информационного графа системы уравнений.

Данный метод может быть сравнительно легко формализован для решения систем уравнений с помощью ЭВМ.

Разработанный алгоритм решения системы линейных и нелинейных уравнений с применением матрицы смежности ДИГ и анализом ее по столбцам строит ациклический граф метода Гаусса исключения неизвестных.

Список литературы: 1. Новые принципы анализа и синтеза ХТС.—«Теор. основы хим. технол.», 1970, т. 4, № 2, с. 152—158. Авт.: Н. М. Жаворонков, В. В. Кафаров, В. Л. Перов и др. 2. Кафаров В. В., Перов В. Л., Мешалкин В. П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М., «Химия», 1974. 344 с. 3. Алгоритм определения оптимального порядка расчета математической модели химико-технологической системы. Авт.: В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин и др.—«Теор. основы хим. технол.», 1975, т. 9, № 1, с. 152—156. 4. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем. М., Изд. АН СССР, 1951. 342 с.

УДК 621.9

Г. А. САЛОП, Н. В. МИЛЮТИНА
Харьковский институт радиоэлектроники

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СБОРКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УЗЛА РЭА ПО ТОЧНОСТНОМУ КРИТЕРИЮ

Автоматизация технологического проектирования с применением ЭВМ дает ощутимый технический и экономический эффект, в связи с чем она является актуальной проблемой для приборостроения и радиопромышленности. Однако ее решение связано с большими трудностями. Если в машиностроении в технологическом проектировании процессов механической обработки деталей ЭВМ применяют давно, то в радиопромышленности вследствие сложности и многообразия технологических процессов (ТП) изготовления деталей и узлов и выполнения сборочно-монтажных процессов при технологическом проектировании необходимы большие затраты времени, так как используется ручной способ проектирования. Большая трудоемкость и сложность проектирования ТП не позволяет проверить различные варианты для выбора автоматизации проектирования ТП (АПТП) обработки деталей на основе классификации поверхностей или классификации деталей. В них используются алгоритмы для построения размерной цепи детали [1].

Наиболее сложные вопросы АПТП — задачи проектирования сборочно-монтажных процессов, алгоритмизация которых сопряжена с преодолением трудностей, связанных с наличием ряда сборочных операций, необходимостью их оптимального выбора по критериям точности выходных параметров сборочной единицы или изделия, учета вероятностных характеристик параметров составляющих элементов. Для отдельных видов сборочных процессов (полной и неполной взаимозаменяемости) было предложено

решение, получаемое при заданной точности по критерию минимальной себестоимости (задача выпуклого программирования).

Авторами на ЦВМ решена задача оптимального синтеза сборочного процесса узлов РЭА и ЭВА по точностному критерию. Решение о варианте сборочного процесса выбирали путем сравнения результатов точностного анализа выходных параметров (в рамках общей теории точности [2]) по известной точности параметров элементов и погрешности, вносимой сборочно-монтажными операциями, с допустимыми значениями точности выходных параметров и последующим логическим анализом результатов этого сравнения с учетом ограничений по критерию себестоимости. В результате решения задачи получим рекомендации по выбору оптимального варианта сборки (полной и неполной взаимозаменяемости, групповой подгонки или регулировки). Алгоритм решения такой задачи может быть получен применительно к функциональному узлу, блоку или изделию (аппарату) в целом. Математическое описание (модель) для решения такой задачи представляется в виде системы уравнений и неравенств. При синтезе сборки функционального узла модель имеет вид

$$\sigma_{i\text{пв}}^2 = \sigma_{i\text{сб}}^2 + \sum_{j=1}^n A_{ij}^2 \sigma_j^2 + 2 \sum_{j>U}^n \rho_{ij} A_{ij} A_{iu} \sigma_j \sigma_u$$

$$i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$\sigma_{i\text{доп}} > \sigma_{i\text{пв}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{i\text{доп}} \geq \frac{1}{k_2} \sigma_{i\text{пв}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{i\text{пв}}$ — получаемое по условию полной взаимозаменяемости среднеквадратическое отклонение i -го выходного параметра; $\sigma_{i\text{сб}}$ — среднеквадратическое отклонение i -го выходного параметра, получаемое в результате влияния самого сборочного процесса; σ_j — среднеквадратическое отклонение j -го параметра элемента; A_{ij} — коэффициент влияния j -го параметра элемента на i -й выходной параметр узла; ρ_{ij} — коэффициент корреляции между параметрами многомерных элементов; n — количество параметров, составляющих узел элементов; m — количество выходных параметров узла; $\sigma_{i\text{доп}}$ — допустимое среднеквадратическое отклонение выходного параметра; k_2 — коэффициент риска.

Первая группа (1), включающая m уравнений, отражает функциональные взаимосвязи между выходными параметрами узла и параметрами составляющих его элементов с учетом погрешностей, вносимых самим сборочным процессом. Вторая группа (2) неравенств определяет условие выполнения сборочного процесса методом полной взаимозаменяемости. Группа (3) неравенств определяет условие выполнения сборочного процесса методом полной взаимозаменяемости, группа (3) неравенств — условие выполнения сборочного процесса методом неполной взаимозаменяемости, где коэффициент риска k_2 означает допус-

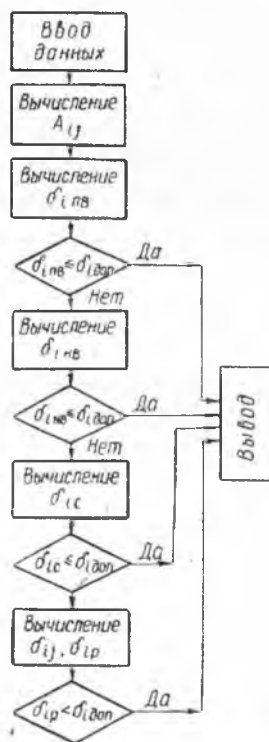
тимый по критерию себестоимости процент брака. Невыполнение условия (3) требует перехода к методу групповой взаимозаменяемости с предварительной селекцией заранее оговоренного числа элементов и уменьшенной величиной σ_j . Если и в этом случае не удастся выполнить $\sigma_{\text{доп}}$, необходимо переходить к методам подгонки или регулировки.

При решении задачи синтеза сборочного процесса известны все входящие в выражения (1) — (3) величины и дополнительные условия для методов групповой взаимозаменяемости, подгонки и регулировки. Таким образом, в результате решения задачи получим одно оптимальное решение. Параметры элементов представляют собой случайные величины с известным законом распределения. Для общности методики расчета используется решение нормального закона распределения с учетом влияния законов распределения с помощью специальных коэффициентов относительного рассеивания. Выражение (1) носит приближенный характер и полностью справедливо лишь при линейной зависимости между выходными параметрами узла и параметрами элементов. При нелинейной зависимости могут иметь место дополнительные ошибки, однако для случая, представляющего наибольший практический интерес, когда отклонения параметров составляющих элементов невелики, расчеты по приводимой методике обеспечивают хорошее приближение.

На рисунке показана разработанная блок-схема алгоритма решения поставленной задачи синтеза процесса сборки. Блок ввода исходных данных требует задания уравнения выходного параметра $N_i = f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m)$ как функции параметров элементов x_j , величин $\sigma_{\text{исб}}$, σ_j , $\sigma_{\text{доп}}$, k_{Σ} , σ_j , l (число селектуемых элементов), номинальных значений параметров элементов x_{j0} .

Уравнение выходного параметра используем для определения коэффициентов влияния A_{ij} методом частных производных и последующего формирования уравнения погрешности (1). Возможно также формирование уравнения погрешности по статистическим данным планируемого эксперимента или путем регрессионно-корреляционного анализа по данным пассивного эксперимента.

Затем вычисляем погрешность параметра N_i . Одновременно при этом определяем среднеквадратическое отклонение и макси-



мальное отклонение $\sigma_{i\text{пв}} = 3\sigma_{i\text{пв}}$ при условии учета законов распределений всех параметров элементов и искусственного приведения их к эквивалентному нормальному (по уровню $P = 0,9973$) путем введения коэффициентов относительного рассеивания k_i , используемых в теории точности. В этом случае на основании (1)

$$\sigma_{i\text{пв}}^2 = k_i^2 \sigma_{ic6}^2 + \sum_{i=1}^n A_{ij} k_i^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{j>u}^n \rho_{ju} A_{ij} A_{iu} k_i k_u \sigma_i \sigma_u; \quad (4)$$

$$\delta_{i\text{пв}} = 3\sigma_{i\text{пв}}, \quad (5)$$

где k_i — коэффициент относительного рассеивания, $k_i = \frac{6\sigma_i}{\Delta_i}$; Δ_i — поле рассеивания величины параметра N_i для $P = 0,9973$.

При решении задачи синтеза процесса сборки последовательно проверяем возможность применения каждого из перечисленных ранее методов сборки. Критерием возможности применения метода полной взаимозаменяемости является выполнение условия (2) при выполнении перехода к величине $\delta_{i\text{пв}}$:

$$\delta_{i\text{пв}} \leq \delta_{i\text{доп}}. \quad (6)$$

В случае выполнения условия (6) оптимален метод полной взаимозаменяемости и дальнейший анализ не производится, результаты вычисления и сравнения поступают на вывод (1). Если условие (6) не выполняется, необходимо сделать вывод о невозможности применения метода полной взаимозаменяемости. Обеспечить требуемую точность выходных параметров можно будет в результате селекции выходных элементов для уменьшения их погрешностей, что достаточно трудоемко и увеличивает себестоимость, или в результате допускаемого процента брака изделий по точностным характеристикам выходных параметров N_i . В большинстве случаев, особенно в условиях крупносерийного и массового производства, следует предпочесть второй вариант и перейти к дальнейшим расчетам, анализируя возможность применения метода неполной взаимозаменяемости. Отклонение δ_i выходного параметра N_i должно удовлетворить условию (3), а с учетом (4), (5) получим условие (7) для выполнения сборочного процесса методом неполной взаимозаменяемости:

$$\delta_{i\text{пв}} = \frac{1}{k_i} \delta_{i\text{пв}} \leq \delta_{i\text{доп}}. \quad (7)$$

Коэффициент риска $k_\Sigma > 1$ для метода неполной взаимозаменяемости выбираем исходя из допустимого процента брака (при выполнении гипотезы о нормальном распределении величин N_i). Ниже приведены значения k_Σ в зависимости от допустимого процента риска (брака).

Процент риска	0,5	1,0	2,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
k_Σ	1,05	1,11	1,21	1,30	1,33	1,36	1,40	1,44

Для функциональных узлов РЭА с числом значимых элементов от 5 до 20 удовлетворительные результаты получены для большинства случаев при проценте риска, равном двум ($k_2 = 1,21$).

В случае выполнения условия (7) при заданном k_2 оптимален метод неполной взаимозаменяемости. Предельная величина k_2 определяется затратами, связанными с исправлением допускаемых бракованных изделий. При выполнении условия (7) дальнейший анализ прекращается (рисунок), результаты расчета и анализа поступают на вывод. Если же это условие не выполняется, дальнейший анализ продолжается. Теперь анализируется возможность использования метода групповой взаимозаменяемости, когда необходимо выбрать группу элементов с наибольшими значениями коэффициентов влияния A_{ij} и применить селекцию этих элементов, заранее оговорив пределы уменьшения отклонений параметров элементов. В этом случае погрешность выходного параметра δ_{ic} должна удовлетворить условию

$$\delta_{ic} \leq \delta_{i\text{доп}}. \quad (8)$$

Количество селективируемых элементов и их допустимые отклонения определяются стоимостными ограничениями. Для реальных технологических процессов изготовления деталей, комплектующих элементов сборки, можно использовать функциональную взаимосвязь между стоимостью и точностью в виде аппроксимирующих зависимостей [3] вида

$$C = a + \frac{b}{\delta^2}, \quad (9)$$

где C — стоимость; a , b — постоянные величины для определенного технологического процесса.

Как видно из рисунка, выполнение условия (8) завершает решение задачи выводом о том, что оптимальным является метод групповой взаимозаменяемости. Если же, несмотря на дополнительные ограничения, условие (8) не выполняется, необходимо перейти к методу подгонки и регулировки. В качестве регулировочного элемента выбирается элемент с максимальным A_{ij} . Погрешность δ_{ij} этого элемента равна нулю, что позволяет уменьшить отклонения выходного параметра δ_{ip} . Далее оцениваем величину компенсации отклонения элемента δ_{ij} из условия (принимая $\delta_{ip} \leq \delta_{i\text{доп}}$)

$$B = \delta_{i\text{пв}} - \delta_{ip}. \quad (10)$$

Величина $\delta_{i\text{пв}}$ определена ранее из (4), (5), диапазон отклонения ее

$$\delta_{ij} = \frac{B}{A_{ij}}. \quad (11)$$

Если

$$\delta_{ip} < \delta_{i\text{доп}}, \quad (12)$$

выбранный вариант метода подгонки и регулировки удовлетворяет решению задачи оптимального синтеза технологического процесса сборки. Когда величина δ_{ij} незначительна, она может быть компенсирована в результате операций при сборке (метод подгонки). Если δ_{ij} сравнительно велика, вводится дополнительный элемент (компенсатор) с необходимым диапазоном изменения параметра N_{ij} .

При помощи приведенной блок-схемы алгоритма проанализирован ряд функциональных узлов на дискретных элементах, гибридных микросхемах, а также механические узлы. Так был выполнен синтез метода сборки функционального узла — одновибратора с эмиттерной связью, у которого пассивные элементы имеют одинаковые допустимые отклонения (± 2 , ± 5 , $\pm 10\%$), а выходным параметром является время восстановления t_v схемы.

При этом $\delta \frac{\Delta t_v}{t_v} = \pm 15\%$. Результаты определения метода сборки при коэффициенте риска $k_z = 1,21$ приведены ниже:

δ_{t_i}	2%	5%	10%
Метод сборки	полной взаимозаменяемости	неполной взаимозаменяемости	селективный (два элемента)
$\delta \frac{\Delta t_v}{t_v}$	6,2%	14,7%	13,7%

Разработанная методика апробирована на 60 разновидностях функциональных узлов различной сложности и ряде механических узлов. Она оказалась эффективной и позволила автоматизировать процесс выбора оптимального варианта сборочного процесса.

Список литературы: 1. Цветков В. Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов. М., «Машиностроение», 1972. 240 с. 2. Бородачев Н. А. Основные вопросы теории точности производства. М., Изд-во АН СССР, 1950. 416 с. 3. Игнатьев В. В. Некоторые вопросы оптимального синтеза радиотехнических узлов заданной точности по критерию минимальной себестоимости. — «Тр. Ленингр. ин-та авиационного приборостроения», 1971, вып. 70, с. 211—218.

УДК 62—501.7

Б. Е. КУХАРЕВ, канд. техн. наук
Харьковский инженерно-строительный институт

СИСТЕМА ЦЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Центральное место в теории принятия решений занимает вопрос об измерении степени соответствия альтернативного решения поставленной цели. При этом цель определяется как желаемый результат деятельности. Альтернативное решение есть не-

который возможный вариант деятельности. Исходя из таких определений видим, что для измерения и оценки решений должно существовать некоторое отображение α множества возможных решений Ω на множество результатов. Однако не всякий результат может быть достигнут в реальных условиях, так как всегда существуют некоторые ограничительные условия на возможные варианты деятельности. Поэтому $\alpha: \Omega \rightarrow X_0 \subseteq X$. Здесь X — полное множество результатов; X_0 — множество результатов, достижимых при помощи решений ω из допустимого множества Ω . В этом случае для всякого $\omega \in \Omega$ существует такое $x \in X_0$, что

$$x = \alpha(\omega). \quad (1)$$

Для аргументированного принятия рационального решения ω , удовлетворяющего поставленной цели, исследователь должен иметь представление о «желаемом» $x^* \in X$ и «нежелаемом» $x^0 \in X$ результате деятельности, а также о количественной шкале «полезности» результатов, ограниченной x^0 и x^* . Причем x^0 , x^* не обязательно принадлежат X_0 . Если $x^* \in X_0$, то такое x^* можно считать идеальным результатом или «идеалом», к которому следует стремиться. Как правило, представление результатов x^0 , x^* не составляет серьезных трудностей.

Каждый результат $x \in X$ может представлять собой скаляр или вектор. В простейших ситуациях принятия решения степень достижения цели описывается единственным критерием (фактором оценки). В этом случае α — критерий, x — скаляр и множество вариантов решений отображается на шкалу «полезности», расположенную на числовой оси R , т. е. $X \subseteq R$. Для таких ситуаций проблема оптимизации заключается только в выборе подходящего метода поиска экстремума, который определяется спецификой математической модели.

В более сложных ситуациях результат деятельности затруднительно описать единственным критерием, но возможна декомпозиция цели на множество подцелей $N = (1, 2, \dots, n)$. Тогда подцели рассматриваем как факторы достижения цели, а степень ее достижения определяем в зависимости от степени достижения каждой из подцелей, измеряемой собственным критерием. Такая ситуация получила название многокритериальной. Для нее X есть декартово произведение однофакторных шкал оценки (критериев): $X = X_N = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$. В этом случае каждое альтернативное решение ω имеет образ в виде n -мерного вектора оценок x_N по соответствующим критериям: $x_N = \alpha(\omega) = (x_1 x_2 \dots x_n) \in X_N$.

Проблема поиска компромиссного решения $\omega \in \Omega$, в наилучшей степени удовлетворяющего комплексу подцелей N , может быть решена в результате синтеза функции многофакторной или многокритериальной полезности U . Эта функция реализует отображение факторного пространства X_N на числовую ось R :

$$U: X_N \rightarrow R. \quad (2)$$

т. е. вводит отношение кvasи-порядка на множестве векторов X_N . В основополагающей работе Д. Неймана, О. Morgenштерна [1] доказано существование непрерывной функции полезности для произвольных объектов, допускающих возможность сравнения. В нашем случае построение такой функции правомерно, так как объекты x_N сравнимы между собой. Сравнимость векторов x_N объясняется тем, что это образы различных способов достижения одной и той же цели. Синтез функции многофакторной полезности позволит искать компромиссное решение путем оптимизации функции U . Существует множество различных функций многофакторной полезности (аддитивная, мультипликативная, максиминная), однако неясно, какую из них принять в конкретных условиях. Ниже синтезируется полная система целеобразующих принципов. Каждому принципу ставится в соответствие свой тип функции многофакторной полезности. Тем самым определяются области применимости этих функций.

Для формального анализа целеобразующих принципов разделим множество факторов оценки N на два непустых подмножества P и $S = N \setminus P$. Тогда $x_N = (x_P x_S)$. Под x_N будем понимать вектор x_N , все компоненты которого соответствуют «желаемым» значениям факторов оценки (критериев), $x_N = (x_1 x_2, \dots, x_n)$ и соответственно $x_N = (x_1 x_2 \dots x_n)$. То же относится и к векторам x_P, x_S .

Введем в качестве постулата следующее очевидное условие: если два вектора отличаются значениями компонент только одного подмножества (например, P), причем $x_P \succ x'_P$, то вектор, соответствующий x_P , не может быть предпочтительнее (полезнее), т. е.

$$(x_P x_S) \succ (x'_P x_S). \quad (3)$$

На основании (3) запишем выражение для возможных решений A, B, C, D, E , характеризующих своими векторами оценок:

$$(x_N)_A \sim (x_P x_S)_B \sim (x_P x_S)_C \sim (x_P x_S)_D \sim (x_N)_E. \quad (4)$$

Этому выражению удовлетворяет 16 профилей предпочтений $\Pi_k = (\pi_1 \pi_2 \pi_3 \pi_4)_k$ ($k = 1, 2, \dots, 16$), где π обозначает либо отношение порядка $\succ$, либо эквивалентности $\sim$:

$$(x_N)_A \pi_1 (x_P x_S)_B \pi_2 (x_P x_S)_C \pi_3 (x_P x_S)_D \pi_4 (x_N)_E. \quad (5)$$

Возможные профили (5) приведены в таблице.

Проанализируем полученные профили предпочтений по критерию непротиворечивости. Для этого покажем, что отношения π_1, π_2 должны принадлежать к одному типу (либо отношению порядка, либо эквивалентности). Из (5) следует, что π_1 характеризуется

$$(x_P)_A = (x_P)_B = x_P, (x_S)_A \succ (x_S)_B, \quad (6)$$

$$(x_P)_B = (x_P)_C = x_P, \quad (x_S)_B \vdash (x_S)_C. \quad (7)$$

Таким образом, переход от A к B и от B к C характеризуется одинаковыми соотношениями (6), (7). Значит, отношения π_1, π_2 должны относиться к одному типу

$$\pi_1 = \pi_2. \quad (8)$$

Аналогично

$$\pi_3 = \pi_4, \quad (9)$$

так как π_3 характеризуется

$$(x_S)_C = (x_S)_D = x_S, \quad (x_P)_C \vdash (x_P)_D,$$

π_4 —

$$(x_S)_D = (x_S)_E = x_S, \quad (x_P)_D \vdash (x_P)_E.$$

Условиям (8), (9) удовлетворяют только профили $\Pi_1, \Pi_4, \Pi_{13}, \Pi_{16}$. Для всех остальных не выполняется либо (8), либо (9), либо и то, и другое. Среди отобранных профилей предпочтений Π_{16} можно считать тривиальным, так как из него следует $(x_N) \sim (x_N)$ (считается, что транзитивность предпочтений имеет место). Иначе говоря, для профиля Π_{16} не существует проблемы оценки решений, так как исследователь безразличен к результатам деятельности. Значит, профили Π_1, Π_4, Π_{13} определяют полную систему целеобразующих принципов в ситуациях многофакторной (многокритериальной) оценки.

Сочетательный принцип. Профиль предпочтений Π_1 соответствует ситуациям, когда только наличие всех n оценок x_i влечет за собой максимальную степень достижения цели, и только наличие всех n оценок x_i влечет за собой минимальную степень достижения цели. Если же имеется непустое множество факторов $P \subset N$, для которых $x_i \vdash x_i \vdash x_i, i \in P$, то независимо от значений факторов из множества $S = N \setminus P$ выполняется условие

$$(x_N) \vdash (x_P x_S) \vdash (x_N). \quad (10)$$

Свое название этот принцип получил в связи с тем, что каждый i -й фактор, для которого $x_i \neq x_i$, вносит ненулевой вклад в общую полезность на всей области определения x_N .

Конъюнктивный принцип. Профиль предпочтений Π_4 соответствует ситуациям, когда при наличии непустого множества факторов $P \subset N$ с нулевыми оценками x_i независимо от значений остальных факторов выполняется

$$(x_P x_S) \sim (x_N). \quad (11)$$

Таблица профилей предпочтений Π_k

Π_k	π_1	π_2	π_3	π_4
Π_1	~	~	~	~
Π_2	~	~	~	~
Π_3	~	~	~	~
Π_4	~	~	~	~
Π_5	~	~	~	~
Π_6	~	~	~	~
Π_7	~	~	~	~
Π_8	~	~	~	~
Π_9	~	~	~	~
Π_{10}	~	~	~	~
Π_{11}	~	~	~	~
Π_{12}	~	~	~	~
Π_{13}	~	~	~	~
Π_{14}	~	~	~	~
Π_{15}	~	~	~	~
Π_{16}	~	~	~	~

Свое название этот принцип получил по логической операции конъюнкции, так как наличие неудовлетворительного значения хотя бы по одному фактору оценки влечет за собой невыполнение общей цели.

Дизъюнктивный принцип. Профиль предпочтений Π_{13} соответствует ситуациям, когда при наличии непустого подмножества факторов P с идеальными оценками x_i^* независимо от значений остальных факторов выполняется

$$(x_P x_S) \sim (x_N^*). \quad (12)$$

Свое название этот принцип получил также по логической операции дизъюнкции, так как наличие идеальной оценки хотя бы по одному фактору оценки влечет за собой максимальную степень достижения цели.

Конъюнктивный и дизъюнктивный принципы в отличие от сочетательного являются диктаторскими в определенных областях, так как для них любой i -й фактор может определить общую полезность независимо от других факторов, если $x_i = x_i^*$ ($x_i = x_i^*$) для конъюнктивного (дизъюнктивного) принципа.

В работе [2] указано, что существует только три типа функций полезности: аддитивные, супераддитивные и субаддитивные. Полученные принципы целеобразования порождают функции полезности, соответствующие этим трем типам. Используя математическое выражение для функции полезности [1] можно показать, что для независимых по полезности подмножеств факторов P, S сочетательному принципу (10) соответствует аддитивная функция

$$U(x_P x_S) = U(x_P) + U(x_S), \quad (13)$$

конъюнктивному принципу (11) — супераддитивная функция

$$U(x_P x_S) \geq U(x_P) + U(x_S), \quad (14)$$

дизъюнктивному принципу (12) — субаддитивная функция

$$U(x_P x_S) \leq U(x_P) + U(x_S). \quad (15)$$

При наличии зависимости по полезности между факторами из подмножеств P, S соотношения (13) — (15) принимают вид

для сочетательного принципа $U(x_P x_S) = U(x_P) + U(x_S)|_{x_P}$;

для конъюнктивного принципа $U(x_P x_S) \geq U(x_P) + U(x_S)|_{x_P}$;

для дизъюнктивного принципа $U(x_P x_S) \leq U(x_P) + U(x_S)|_{x_P}$.

Здесь $U(x_S)|_{x_P}$ — полезность $U(x_S)$ при условии, что подмножество факторов P характеризуется вектором x_P .

Список литературы: 1. Нейман Д., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. М., «Наука», 1970. 708 с. 2. Любс Р. Д., Райфа Х. Игры и решения. М., ИЛ, 1961. 642 с.

О ФУНКЦИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ПОЛЕЗНОСТИ

При составлении математической модели задачи принятия решения исследователь часто сталкивается с ситуацией, когда для оценки решений существует более одного критерия. Это объясняется многоцелевым характером ситуаций. В то же время теоретические оптимизационные модели предполагают наличие единственного критерия. Такое положение определило значительный интерес, который проявляется к методам решения задач векторной (многокритериальной) оптимизации.

Все множество методов векторной оптимизации, несмотря на их многообразие, можно классифицировать следующим образом:

а) методы функции многокритериальной полезности, характеризующиеся синтезом единственного обобщенного критерия на основе заданного множества локальных критериев [1, 2];

б) алгоритмические методы, регламентирующие некоторую последовательность решения специальным образом составленных задач оптимизации (иногда в человеко-машинном диалоге) [3, 4].

Преимущество методов, относящихся к первому классу, — численная оценка оптимального решения, а также численное сравнение его с другими интересующими решениями и с «идеалом» (если он известен).

Теоретическая база для построения функции полезности заложена Д. Нейманом и О. Моргенштерном в работе [5], где впервые сформулирована система аксиом рационального поведения, на основании которых доказано существование и единственность индивидуальной (локальной) функции полезности. Эти аксиомы имеют следующий смысл.

А 1. Сравнимость объектов оценки и транзитивность предпочтений. Для любой пары ω_1, ω_2 выполняется только одно из отношений $\omega_1 \prec \omega_2$, $\omega_1 \succ \omega_2$, $\omega_1 \sim \omega_2$. Причем из $\omega_1 \prec \omega_2$, $\omega_2 \prec \omega_3$ следует $\omega_1 \prec \omega_3$.

А 2. Непрерывность. Если $\omega_1 \prec \omega_2 \prec \omega_3$, то существует такой параметр $r \in [0, 1]$, что $\omega_2 \sim [r\omega_1 + (1-r)\omega_3]$.

А 3. Справедливость коммутативного и дистрибутивного законов: $[r\omega_1 + (1-r)\omega_2] \sim [(1-r)\omega_2 + r\omega_1]$; $\{r[q\omega_1 + (1-q)\omega_2] + (1-r)\omega_2\} \sim [p\omega_1 + (1-p)\omega_2]$ ($p = rq$).

При выполнении аксиомы 1—3 существует функция полезности, отображающая множество объектов оценки в вещественные числа. Для нее выполняется

$$\begin{aligned} u(\omega_1) &< u(\omega_2) \text{ при } \omega_1 \prec \omega_2; \\ u(\omega_1) &= u(\omega_2) \text{ при } \omega_1 \sim \omega_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Эта функция имеет вид

$$u(\omega) = u[r(\omega_1) + (1 - r)\omega_2] = ru(\omega_1) + (1 - r)u(\omega_2). \quad (2)$$

Функция полезности u является единственной с точностью до положительного линейного преобразования, т. е. для любой другой функции v , удовлетворяющей этим аксиомам, справедливо

$$v(\omega) = \alpha u(\omega) + \beta, \quad \alpha > 0. \quad (3)$$

В работе [5] и многих последующих работах параметр r в (2) трактовался как значение вероятности в лотерее, имеющей два исхода (ω_1, ω_2) . Однако современная теория расплывчатых множеств [6] позволяет предложить иную трактовку: если $\omega_1 \succ \omega \succ \omega_2$, то параметр $r \in [0, 1]$ является степенью принадлежности объекта ω_1 к расплывчатому множеству полезности, для которого высшей степенью принадлежности обладает объект ω_1 , низшей — объект ω_2 . Тогда $r(\omega)$ является функцией принадлежности ω к этому же расплывчатому множеству.

Пусть имеется множество локальных критериев оценки $N = (1, 2, \dots, n)$. Тогда задача векторной оценки включает два этапа: этап оценки объектов ω по каждому i -му локальному критерию $x_i = u_i(\omega)$, $x_i \in X_i$ и этап оценки объектов $x_N = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X_N$, где X_N — декартово произведение измерительных шкал локальных критериев $X_N = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$.

Введем допущение, что аксиомы 1—3 справедливы не только для объектов ω , но и для векторов оценок $x_N \in X_N$, а значит, существует отображение

$$U: X_N \rightarrow R^1. \quad (4)$$

Это является довольно сильным допущением и против него наиболее вероятными возражениями являются следующие: объекты x_N несравнимы; предпочтения на X_N нетранзитивны. Ответом на первое возражение является то, что объекты x_N есть отображение различных способов достижения поставленной цели, причем каждый из них характеризуется своей степенью ее достижения. Следовательно, они сравнимы с точки зрения этой цели. Поэтому несравнимыми с этой точки зрения будут объекты, не имеющие отношения к данной цели. Случай несравнимости — отсутствие цели, но здесь отпадает необходимость в определении полезности объектов. По поводу второго возражения трудно дать столь категоричный ответ. Однако эксперименты показывают, что принимаемые решения являются, как правило, транзитивными [7].

Для получения вида функции многокритериальной полезности сформируем две дополнительные аксиомы.

А 4. Симметрия. Изменение обозначений локальных критериев не изменяет характер предпочтений: $(x_1 \dots x_i \dots x_l \dots x_n) \sim (x_1 \dots x_j \dots x_i \dots x_n)$.

Эта аксиома в какой-то мере аналогична коммутативному закону из А3, откуда следует, что не накладывается какое-либо

ограничение на способ нумерации локальных критериев. В дальнейшем, основываясь на А4, будем пользоваться следующей системой обозначений: x_N — вектор оценок по всем локальным критериям; x_P — вектор оценок по локальным критериям из непустого множества $P \subset N$; $x_{N|P}$ — вектор оценок по локальным критериям из множества, являющегося разностью $N \setminus P$. Тогда $x_N = (x_P x_{N|P})$, если P — одноэлементное множество, $x_N = (x_i x_{N|i})$.

А 5. Монотонность групповых предпочтений. Всякое улучшение вектора оценок по одному или нескольким локальным критериям при неизменном уровне оценок по остальным приводит к тому, что новый вектор оценок будет по крайней мере не хуже, чем исходный, т. е. из $x_P \prec x_P^*$ следует $(x_P x_{N|P}) \preceq (x_P^* x_{N|P})$.

Предположим, для значений каждого i -го локального критерия задан диапазон

$$x_i' \preceq x_i \preceq x_i^*. \quad (5)$$

Тогда на основании А2 и А5 при любом значении $x_{N|i}$ имеет место

$$(x_i x_{N|i}) \sim [\lambda_i (x_i^* x_{N|i}) + (1 - \lambda_i) (x_i' x_{N|i})], \quad (i \in N). \quad (6)$$

В соответствии с (2) функция полезности i -го локального критерия, учитывающая влияние $x_{N|i}$ на x_i , имеет вид

$$U(x_i x_{N|i}) = \lambda_i (x_i | x_{N|i}) U(x_i^* x_{N|i}) + [1 - \lambda_i (x_i | x_{N|i})] U(x_i' x_{N|i}), \quad (7)$$

где $\lambda_i (x_i | x_{N|i}) \in [0, 1]$ — условная функция принадлежности вектора $(x_i x_{N|i})$ к расплывчатому множеству полезности, определяемому границами $(x_i^* x_{N|i})$ и $(x_i' x_{N|i})$. Термин «условная» здесь понимается так же, как в теории вероятностей по отношению к функциям распределения. Если i -й критерий не зависит по полезности от остальных, то выражение (7) упрощается:

$$U(x_i x_{N|i}) = \lambda_i (x_i) U(x_i^*) + [1 - \lambda_i (x_i)] U(x_i').$$

Функция (7) действительно является функцией полезности локального критерия, несмотря на использование обозначения функции многокритериальной полезности U . Это очевидно, если, используя свойство (3), обозначить $U(x_i^* x_{N|i}) = 1$, $U(x_i' x_{N|i}) = 0$, откуда следует $U(x_i x_{N|i}) = \lambda_i (x_i | x_{N|i})$.

Докажем основное свойство функции многокритериальной полезности.

Теорема. Существует аналитическое выражение функции многокритериальной полезности от совокупности функций полезности локальных критериев.

Доказательство. Доказательство проведем сначала для двумерного случая $x_N = (x_1 x_2)$, а затем распространим полученный результат на любое N .

Запишем выражение (7) для функции полезности второго критерия при условии, что оценка первого x_1

$$U(x_1 x_2) = \lambda_2(x_2 | x_1) U(x_1 \tilde{x}_2) + [1 - \lambda_2(x_2 | x_1)] U(x_1 x'_2). \quad (8)$$

Аналогично запишем выражения для функции полезности первого критерия при $\tilde{x}_2, x'_2$:

$$U(x_1 \tilde{x}_2) = \lambda_1(x_1 | \tilde{x}_2) U(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2) + [1 - \lambda_1(x_1 | \tilde{x}_2)] U(x'_1 \tilde{x}_2); \quad (9)$$

$$U(x_1 x'_2) = \lambda_1(x_1 | x'_2) U(\tilde{x}_1 x'_2) + [1 - \lambda_1(x_1 | x'_2)] U(x'_1 x'_2). \quad (10)$$

Используя АЗ, подставляем (9), (10) в (8). Тем самым мы дополняем характеристику предпочтений по второму критерию (8) соответствующими характеристиками по первому (9), (10). В результате получаем функцию полезности объекта $(x_1 x_2)$ по двум локальным критериям:

$$\begin{aligned} U(x_1 x_2) = & \lambda_1(x_1 | \tilde{x}_2) \lambda_2(x_2 | x_1) U(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2) + [1 - \lambda_1(x_1 | \tilde{x}_2)] \times \\ & \times \lambda_2(x_2 | x_1) U(\tilde{x}_1 x'_2) + \lambda_1(x_1 | x'_2) [1 - \lambda_2(x_2 | x_1)] U(x'_1 \tilde{x}_2) + \\ & + [1 - \lambda_1(x_1 | x'_2)] [1 - \lambda_2(x_2 | x_1)] U(x'_1 x'_2). \end{aligned} \quad (11)$$

На основании А2, А5 выразим $U(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2)$, $U(\tilde{x}_1 x'_2)$ через граничные значения:

$$U(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2) = \lambda_{(12)}(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2) U(x_1 \tilde{x}_2) + [1 - \lambda_{(12)}(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2)] U(x_1 x'_2); \quad (12)$$

$$U(\tilde{x}_1 x'_2) = \lambda_{(12)}(\tilde{x}_1 x'_2) U(x_1 \tilde{x}_2) + [1 - \lambda_{(12)}(\tilde{x}_1 x'_2)] U(x_1 x'_2). \quad (13)$$

Используя АЗ, подставим (12), (13) в (11). В результате получим

$$U(x_1 x_2) = \lambda_{(12)}(x_1 x_2) U(x_1 \tilde{x}_2) + [1 - \lambda_{(12)}(x_1 x_2)] U(x_1 x'_2), \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \lambda_{(12)}(x_1 x_2) = & \{1 - [1 - \lambda_1(x_1 | \tilde{x}_2)] [1 - \lambda_{(12)}(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2)]\} \lambda_2(x_2 | x_1) + \\ & + \lambda_1(x_1 | x'_2) \lambda_{(12)}(\tilde{x}_1 x'_2) [1 - \lambda_2(x_2 | x_1)]; \quad \lambda_{(12)}(x_1 x_2) \in [0, 1]. \end{aligned} \quad (15)$$

Следовательно, полученная функция (14) реализует $U: (X_1 \times X_2) \rightarrow R^1$. Это значит, что совокупность первого и второго локальных критериев можно заменить новым скалярным критерием $x_{(12)}$, для которого $\tilde{x}_{(12)} \approx x_{(12)} \approx x'_{(12)}$. Тогда аналогичные рассуждения для критериев $x_{(12)}$, x_3 приведут к функции полезности трех критериев $x_{(123)}$. Выполнив эту процедуру $(n-1)$ раз, получим функцию полезности для N локальных критериев:

$$U(x_N) = \lambda_N(x_N) U(x_N) + [1 - \lambda_N(x_N)] U(x_N). \quad (16)$$

где $x_N = (\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \dots \tilde{x}_n)$, $x_N x'_2 = x'_1 x_2 \dots x_n$.

При реализации отображения $\rho: \lambda_{I|i}(x_{I|i}) \rightarrow \lambda_{I|i}(x'_{I|i} | x_i)$; значение $\lambda_N(x_N)$ определяется аналогично (15) по рекуррентной формуле

$$\lambda_I(x_I) = \{1 - [1 - \lambda_{I|i}(x_{I|i} | \tilde{x}_i)] [1 - \lambda_I(x'_{I|i} \tilde{x}_i)]\} \lambda_i(x_i | x_{I|i}) +$$

$$+ \lambda_{I \setminus i}(x_{I \setminus i} | x_i') \lambda_I(x_{I \setminus i} | x_i) [1 - \lambda_i(x_i | x_{I \setminus i})], \quad \lambda_I(x_I) \in [0, 1]. \quad (17)$$

Здесь $I = (1, 2, \dots, i)$, $I \setminus i = (1, 2, \dots, i-1)$.

Функция полезности (16) — единственная с точностью до положительного линейного преобразования (3), что очевидно из $U(x_N) = \lambda_N(x_N)[U(x_N'') - U(x_N')] + U(x_N')$. Значит, выбор начала и конца шкалы полезности не принципиален, существенна лишь функция $\lambda_N(x_N)$, которая определяется совокупностью N функций полезности локальных критериев по правилу (17). Теорема доказана.

Воспользовавшись аналогичным приемом, несложно показать, что при $V(x_i x_{N \setminus i}) = \alpha_i U(x_i x_{N \setminus i}) + \beta_i$, $\alpha_i > 0$ имеет место $V(x_N) = \alpha_N U(x_N) + \beta_N$, где α_N , β_N определяется по рекуррентным формулам:

$$\alpha_I = \alpha_{I \setminus i} \alpha_i, \quad \beta_I = \beta_{I \setminus i} \alpha_i + \beta_i.$$

Доказанная теорема принципиально решает вопрос об однозначности функции многокритериальной полезности. Однако полученное выражение (17) неудобно для анализа в реальных задачах. В работе [8] показано, что выполнение аксиомы A5 порождает три целеобразующих принципа в многокритериальных задачах. Для каждого из принципов синтезируется своя функция многокритериальной полезности, являющаяся частным случаем (17), которая носит конструктивный характер.

В настоящей статье в отличие от работы [9] термин «независимость от полезности» i -го критерия обозначает, что функция полезности неизменна при любом значении вектора оценок $x_{N \setminus i}$, т. е. выполняется условие

$$\lambda_i(x_i | x_{N \setminus i}) = \lambda_i(x_i). \quad (18)$$

Это является менее жестким условием, чем эквивалентность различных комбинаций векторных объектов [9]. Поэтому в данной постановке независимость еще не говорит об аддитивности локальных оценок.

Получим условие, при котором выполняется (18). Для этого запишем (7) в виде

$$\lambda_i(x_i | x_{N \setminus i}) = \frac{U(x_i x_{N \setminus i}) - U(x_i' x_{N \setminus i})}{U(x_i'' x_{N \setminus i}) - U(x_i' x_{N \setminus i})}. \quad (19)$$

Дифференцируя (19) по направлению, определяемому вектором $x_{N \setminus i}$, и приравнявая к нулю числитель, получаем требуемое условие

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U(x_i x_{N \setminus i})}{\partial x_{N \setminus i}} [U(x_i'' x_{N \setminus i}) - U(x_i' x_{N \setminus i})] - \frac{\partial U(x_i'' x_{N \setminus i})}{\partial x_{N \setminus i}} \times \\ & \times [U(x_i x_{N \setminus i}) - U(x_i' x_{N \setminus i})] - \frac{\partial U(x_i' x_{N \setminus i})}{\partial x_{N \setminus i}} [U(x_i'' x_{N \setminus i}) - \\ & - U(x_i x_{N \setminus i})] = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Для каждого целеобразующего принципа [8] условие (20) выполняется, если изменение полезности вектора x_N при изменении только одной i -й компоненты может быть описано функцией только от этой компоненты: $U(x_i x_N | i) = \alpha_i(x_i x_i') U(x_i' x_N | i) + \beta_i(x_i x_i')$.

Список литературы: 1. Озерной В. М. Принятие решений.— «Автоматика и телемеханика», 1971, № 11, с. 106—121. 2. Кухарев Б. Е. Выбор компромиссного решения в условиях многокритериальности.— В кн.: Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Вып. 35. Харьков, 1975, с. 6—12. 3. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. М., «Сов. радио», 1964. 388 с. 4. Подиновский В. В., Гаврилов В. М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М., «Сов. радио», 1975. 192 с. 5. Нейман Д., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. М., «Наука», 1970. 708 с. 6. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях.— В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М., 1976, с. 172—215. 7. Гранберг А. Г. Проблема транзитивности индивидуальных и коллективных предпочтений при построении целевых функций.— В кн.: Количественные методы в социологии. М., «Наука», 1966, с. 70—92. 8. Кухарев Б. Е. Система целеобразующих принципов для задач принятия решений. См. статью настоящего сборника. 9. Fishburn P. C. Independence in Utility Theory with Whole Product Sets.— «Operation Research», 1965, vol. 13, № 1, p. 28—45.

Алексеев О. П. Функциональная иерархия и организация	3
Алексеев О. П. Обобщенный алгоритм управления объектами организационно-технического типа	5
Гвоздинский А. Н., Моднов В. П. Синтез иерархической модели объекта управления на основе анализа его организационной и функциональной структур	7
Ашеров А. Т., Кошель Т. В. Об уточнении понятия «ценность экономической информации»	11
Ашеров А. Т., Кошель Т. В. Обобщенная концепция ценности экономической информации, ориентированная на моделирование процессов хранения	17
Гулиус В. А. Приведение записей переменной длины с использованием дескриптора	22
Пятков Ю. П., Акимов А. П., Сизов В. М. Выбор показателя эффективности информационных моделей	28
Авраменко В. П. Методы параметрической идентификации технологических процессов	31
Авраменко В. П. К вопросу параметрической идентификации плохо обусловленных систем	45
Киренко Л. А., Шагаев Ю. В. Описание алгоритма анализа документооборота с помощью ЭВМ	59
Яценко Г. А. Алгоритмы преобразования полноскобочной формы записи в бесскобочные	64
Корытцев Н. В., Прошкин Е. Г., Ульянов Ю. Н. Устройство сопряжения цифрового измерительного прибора с перфоратором	67
Беседин А. С. Методика прогнозирования постепенных отказов систем автоматики в процессе производства и эксплуатации	70
Глущенко В. П., Горяинова Т. С. Расчет режимов работы реактивных рельсовых цепей при помощи ЭВМ	76
Хорошко В. А., Чирков Д. В. Некоторые вопросы построения адаптивных устройств обнаружения сигналов на фоне импульсных помех в автоматизированных системах управления	84
Логвина Н. И., Хорошко В. А., Чирков Д. В. Алгоритм параметрической оптимизации преобразователей информации автоматизированных систем управления	88
Колотенко Г. А., Евтушенко Г. И., Диденко С. Ю. Сопряжение вероятных подсистем пространственно-временных связей с детерминированными функциями АСУ	92
Колотенко Г. А., Евтушенко Г. И., Диденко С. Ю. Системно-кибернетический подход к анализу вероятных подсистем связей — неотъемлемых звеньев АСУ	100
Шостак В. Ф., Петров Г. Н. Многоуровневый подход в задачах разработки (конструирования) оптимального математического описания управляемых технологических комплексов	107
Яценко Г. А. Алгоритм преобразования математических операторов из инфиксной в полноскобочную форму записи	114
Зозуля А. Ф. Принципы построения универсальной программы для расчетов материальных и тепловых балансов некоторых производств основной химии	117
Зозуля А. Ф., Асеев Г. Г. Об одном алгоритме анализа электрических цепей контрольно-измерительных приборов	127
Салон Г. А., Милютин Н. В. Автоматизация процесса выбора оптимального варианта сборки функционального узла РЭА по точностному критерию	133
Кухарев Б. Е. Система целесообразных принципов для задач принятия решений	138
Кухарев Б. Е. О функции многокритериальной полезности	143

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ

Выпуск 48

Редактор *Н. И. Юркевич*
Обложка художника *И. Ф. Кризоручко*
Художественный редактор *А. С. Воробиевко*
Технический редактор *Л. Т. Момот*
Корректор *А. В. Евлакова*

Информ. бланк № 2941

Сдано в набор 7.12.77. Подписано в печать 10.05.78.
БЦ 09175. Формат 60×90/16. Бумага типографская № 3. Лит. гарн.
Выс. печать, 9,75 усл. печ. л. 12 уч.-изд. л. Тираж 1000 экз.
Изд. № 550. Зак. № 7-505. Цена 1 р. 70 к.

Издательство при Харьковском государственном университете
издательского объединения «Вища школа»
310003, Харьков-3, Университетская, 16

Харьковская книжная фабрика «Коммунист» республиканского
производственного объединения «Полиграфкинг» Госкомиздата
УССР, 310012, Харьков-12, Энгельса, 11.