

Автоматизация и Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Главный редактор
В.Л. Белоусов

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

3
—
2011

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

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

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

ООО «Издательство Машиностроение»

РЕДАКЦИЯ:

Шебалин И.Ю. — зам.главного редактора
Гончарова Л.К. — научный редактор
Осипова В.Г. — научный редактор
Богус С.В. — секретарь

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

| | |
|---|----|
| Антонец И.В., Кузьмин А.В. Автоматизированный электропривод кранов-штабелёров | 3 |
| Ашрятов А.А., Мышонков А.Б., Микаева С.А. Измерение температуры кристалла маломощных светодиодов | 10 |
| Филимонов С.В., Лапшин В.И., Лапин В.В., Филимонов В.И. Технология формовки многоэлементного замкнутого профиля с элементами двойной толщины | 14 |
| Баранова Е.М., Баранов А.Н. Проектирование операции вытяжки-обжима оболочек | 19 |

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

| | |
|---|----|
| Головешкин В.А., Пономарёв А.В., Ульянов М.В. Аналитическое решение класса рекуррентных соотношений с аддитивной функцией степенного вида в целях анализа трудоёмкости рекурсивных алгоритмов | 25 |
| Шипилов В.В. Применение множества оптимально расположенных элементов в задачах линейной и многокритериальной оптимизации аппаратной части автоматизированных средств контроля | 30 |
| Лавреш И.И. Самоорганизация объектов управления и меры согласования интересов субъекта и объекта управления ... | 36 |
| Мальцева С.В., Проценко Д.С. Формализованный подход к управлению сетевым сообществом практики | 42 |

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

| | |
|-----------------------------|----|
| По страницам журналов | 47 |
|-----------------------------|----|

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

| | |
|--|----|
| Antonets I.V., Kuzmin A.V. Automatic electric drive for stacker crane | 3 |
| Ashryatov A.A., Myshonkov A.B., Mikaeva S.A. Temperature measurement of the low-power light-emitting diode crystal ... | 10 |
| Filimonov S.V., Lapshin V.I., Lapin V.V., Filimonov V.I. Molding technology of the multiple-unit enclosed shape with double thickness components | 14 |
| Baranova E.M., Baranov A.N. Designing of the draw-forming-wringing out operation | 19 |

MODERN TECHNOLOGIES

| | |
|--|----|
| Goloveshkin V.A., Ponomarev A.V., Ulyanov M.V. Analytical decision of the recurrent correlation class with exponential type additive function for the purpose of recursive algorithms laborious analysis | 25 |
| Shipilov V.V. Optimally located components multitude application in the linear and multicriterion tasks for apparatus part of the automatic control means | 30 |
| Lavresh I.I. Control objects self-organization and agreement measures between control subject and object | 36 |
| Maltseva S.V., Protsenko D.S. Formalized approach to the control of the practice network community | 42 |

SURVEY OF PERIODICALS

| | |
|--------------------------|----|
| Periodicals review | 47 |
|--------------------------|----|

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

Художественный редактор Галицина Т.Н.
Компьютерный набор Путинов В.Н.
Компьютерная верстка Тугаринов А.А.

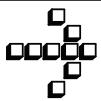
Набрано в ФГУ “Научно-исследовательский институт –
Республиканский исследовательский
научно-консультационный центр экспертизы”
123995, Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13. Тел.: (499) 795 1789

Сдано в набор 30.12.10. Подписано в печать 28.02.11.
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч. изд. л. 7,0. Заказ 118. Цена свободная

Отпечатано в ООО «Подольская Периодика»
142110, Московская обл., г. Подольск,
ул. Кирова, 15

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

ООО «Издательство Машиностроение»,
«Автоматизация и современные технологии», 2011 г.



УДК 621.869.82-5

И.В. Антонец, д-р техн. наук, проф., **А.В. Кузьмин**, канд. техн. наук, доц.
(Ульяновский государственный технический университет)

e.bruzgina@ulstu.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВ-ШТАБЕЛЁРОВ

Рассмотрены исполнительные двигатели кранов-штабелёров, которые разделены на две группы: управляемые (на основе трёхфазных электродвигателей) и регулируемые (на основе электродвигателей постоянного тока). Приведены схемы управления указанными электродвигателями.

Ключевые слова: краны-штабелёры, исполнительные двигатели, трёхфазные электродвигатели, схемы управления.

Actuating motors are considered, which have been divided between two group: controlled (from a three-phase electric motors) and adjusted (from a direct current electric motors). Mentioned motors control schemes are adduced.

Key words: stacker cranes, actuating motors, three-phase electric motors, control schemes.

Основные достоинства автоматизированного электропривода (простота подвода электрической энергии, высокий КПД, электрифицированное автоматическое управление рабочим процессом) сделали его незаменимым в системах автоматического управления (САУ) штабелёрами. На рис. 1 приведена схема автоматизированного электропривода штабелёра. Мощность, потребляемая из электрической сети ($P_C = U_C I_C$), в силовой части системы управления (ССУ) преобразуется в регулируемую электрическую мощность ($P_{ЭЛ} = UI$), подводимую к обмоткам электродвигателя (ЭД). На рис. 1 ЭД представлен двумя элементами —

электромеханическим преобразователем (ЭМП), преобразующим электрическую мощность $P_{ЭЛ}$ в механическую, и массой ротора (РД), на валу которого образуются полезный вращающий момент $M_{ВР}$ и угловая скорость ω . Механическая мощность от ротора передаётся к передаточному механизму (ПМ) и далее — рабочему органу (РО) штабелёра. Система управления (СУ) состоит из ССУ и информационной части [1] (ИСУ), которая получает командные сигналы от задающих устройств (ЗУ), а также информацию о состоянии ЭД и процессе перемещения от датчиков обратной связи (ДОС).

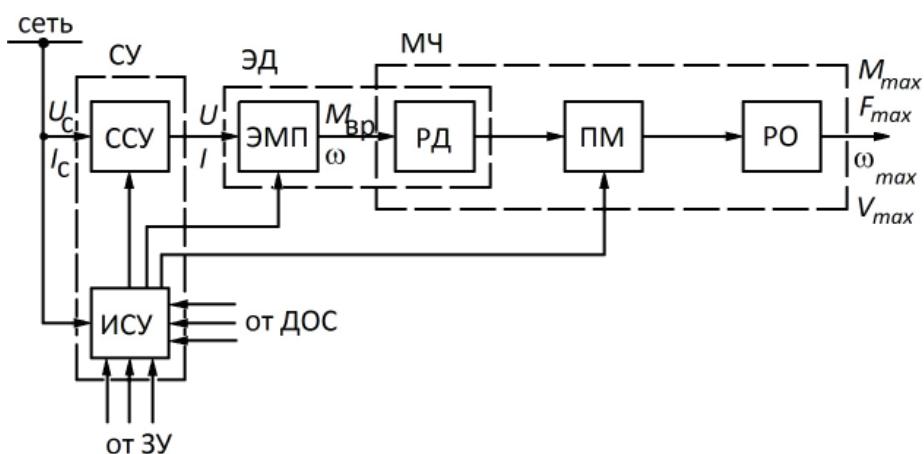


Рис. 1. Схема автоматизированного электропривода штабелёра

На основании этой информации в соответствии с заложенным алгоритмом вырабатываются воздействия на ССУ, ЭМП, ПМ. Электродвигатели определяют энергетические и динамические параметры штабелёров. Для работы штабелёров применяют приводы: управляемые (на основе трёхфазных ЭД с переключаемыми полюсами и фазным ротором, а также с ЭД пониженной скорости, присоединяемым одной муфтой) и регулируемые (на основе ЭД постоянного тока).

Большинство зарубежных фирм и отечественных предприятий применяют в вертикальном и поперечном приводах штабелёров ЭД переменного тока. Например, используют асинхронные электродвигатели (АД) с короткозамкнутым и фазным ротором, отличающиеся простотой, надёжностью и низкой стоимостью. Частота вращения вала АД пропорциональна числу пар полюсов, т. е.

$$n = \frac{60f}{p}(1-S),$$

где f – частота переменного тока; p – число пар полюсов; S – скольжение.

Частота вращения ротора ЭД штабелёров регулируется ступенчато изменением количества пар полюсов АД. Данное регулирование является экономичным, так как снижение скорости происходит в результате уменьшения синхронной частоты вращения ротора при неизменном скольжении.

Число пар полюсов изменяют переключением каждой фазы обмотки ЭД с последовательного соединения на параллельное. Для вертикального и поперечного ЭД используют схему переключения «звезда – двойная звезда» (рис. 2).

Рассматривая механические характеристики данного ЭД, отметим, что при переключении статорной обмотки ЭД со «звезды» на «двойную звезду» мощность P и частота вращения вала n увеличиваются в два раза, а вращающий момент остаётся неизменным. Следовательно, механические характеристики электропривода обеспечива-

вают работу в двигательном режиме и режиме рекуперативного торможения.

Существенным недостатком короткозамкнутых ЭД с переключением полюсов является наличие больших избыточных моментов при пуске и, особенно, переходе с большей скоростью на меньшую. При последовательном включении обмоток большой и малой скоростей во время пуска или перехода с большой скорости на меньшую значительно снижаются максимальный момент в генераторном режиме и пусковой в двигательном. Для устранения этого в цепь статора включают активные и реактивные резисторы. В продольных и вертикальных приводах штабелёра применяется регулирование скорости с помощью двух АД, работающих на один вал. Существует ряд систем регулирования скорости: микропривод, двухдвигательный привод с планетарным редуктором и др. В системе с микроприводом ЭД большой и малой скоростей врашают вал не одновременно. Это требование, обусловленное большим диапазоном частоты вращения, привело к необходимости дистанционного расцепления валов ЭД и рабочего вала с помощью электромагнитных муфт или других средств. Системы с микроприводом, несмотря на сложность конструкции механической части привода, в целом достаточно просты.

В САУ стеллажными кранами-штабелёрами фирма «Demag» (Германия) использует двухдвигательные приводы без сцепной муфты. Вместо разветвления привод малой скорости последовательно соединён с главным ЭД, имеющим конический тормоз. При включении главного ЭД конический тормоз играет роль соединительной муфты, предохраняющей привод от случайного включения ЭД малой скорости. Конструкция конусного тормоза, встроенного в ЭД, представлена на рис. 3.

Тормозной конус 1 обшил фрикционным материалом и закреплён на шлицах вала 2 ЭД, имеющего конический ротор, с возможностью осевого перемещения по шлицам, но удерживающегося в

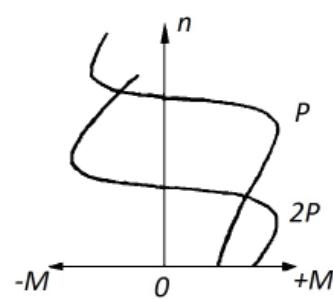
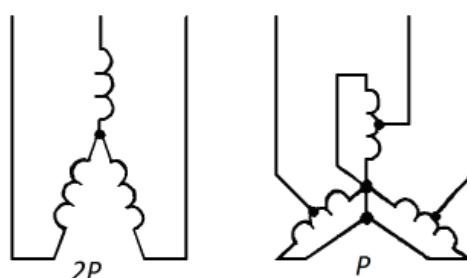


Рис. 2. Схема и механические характеристики асинхронного электродвигателя

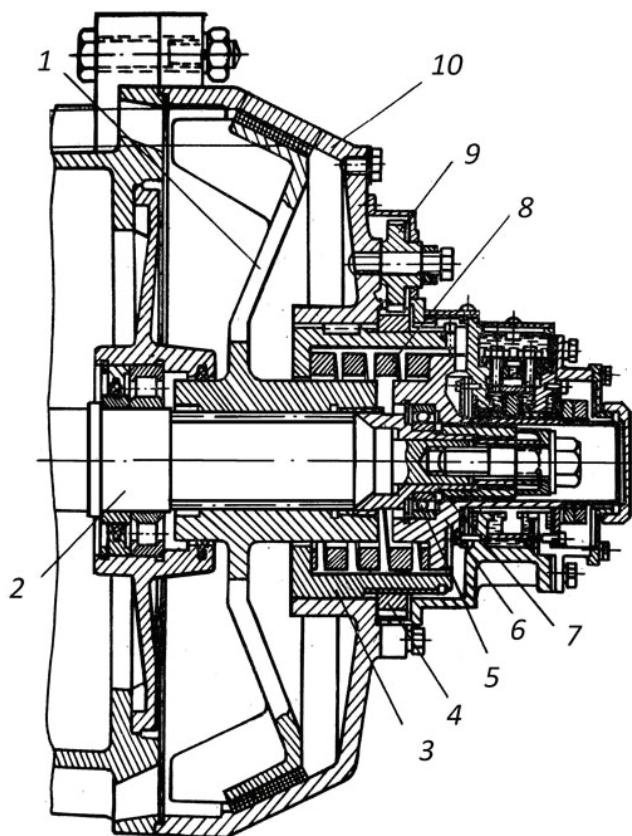


Рис. 3. Конструкция конусного тормоза, встроенного в электродвигатель

определенном положении относительно вала втулкой 7. Осевое усилие замыкания тормоза, создаваемое сжатой пружиной 8, передаётся через деталь 6 и подшипник 5 на вал ЭД и, следовательно, на тормозной конус.

При включении тока конический ротор ЭД вместе с валом и тормозным конусом втягиваются в статор, преодолевая усилие пружины и размыкая тормозное устройство. При выключении тока ротор ЭД вместе с валом и конусом сдвигаются под действием усилия пружины вправо, замыкая тормоз. Чтобы уменьшить удар при замыкании, тормозное устройство снабжено гидравлическим амортизатором. Величина установочной осадки пружины при полностью собранном тормозе регулируется вращением шестерни 9, соединённой с зубчатым колесом гайкой 4, навёрнутой на упорную втулку 3. В результате происходит осевое перемещение втулки, соединённой скользящей шпонкой с корпусом 10.

В приводах штабелёров применяется АД с дифференциальным редуктором (рис. 4).

При согласованной работе ЭД шестерни 1 и 2 вращаются в одну сторону. В этом случае частота вращения выходного вала

$$n_{B_1} = \frac{1}{2}(n_1 + n_2),$$

где n_1 и n_2 – частота вращения ведущих шестерён дифференциала.

При переходе на малую скорость ЭД с большим передаточным числом между валом и дифференциалом реверсируется.

Частота вращения выходного вала

$$n_{B_2} = \frac{1}{2}(n_1 - n_2) \text{ (передаточное число } i_1 < i_2\text{).}$$

Недостатком данного привода является сложность дифференциального редуктора.

Большое распространение в приводах штабелёров получили ЭД постоянного тока. Это объясняется относительно большим диапазоном регулирования скорости. Максимальная скорость передвижения ходового механизма штабелёра составляет 2–3 м/с. «Ползучая» скорость должна быть около 2–3 см/с, так как при заданных массе штабелёра и тормозном моменте установочного тормоза штабелёр должен останавливаться с точностью до 1 мм. Таким образом, диапазон регулирования скорости составляет 1:100.

ЭД постоянного тока имеют существенное достоинство: их движущие моменты зависят не от положения ротора и частоты вращения, а от величины тока в обмотках возбуждения и якоре. Если обмотки возбуждения заменить постоянным магнитом, то движущий момент будет пропорционален току в якоре, а частота вращения зависит только от напряжения питания. ЭД постоянного тока имеют высокое быстродействие и линейные механические характеристики, а также хорошие энергетические показатели. По своим регулировочным свойствам они превосходят другие электрические машины.

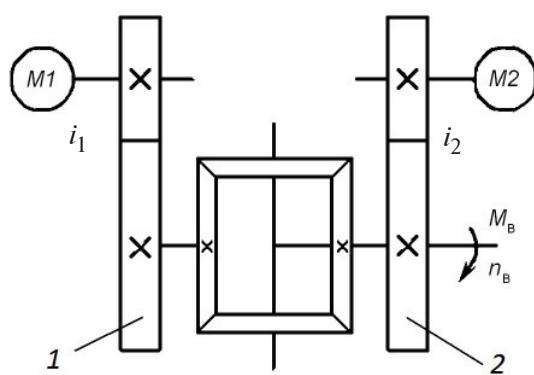


Рис. 4. Привод штабелёра с дифференциальным редуктором

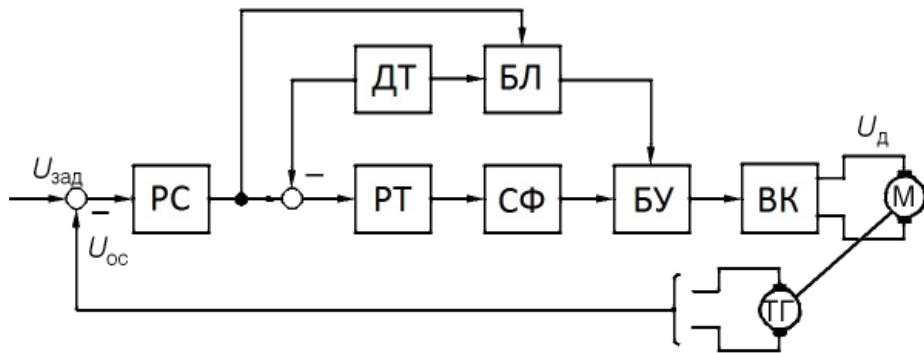


Рис. 5. Функциональная схема тиристорного привода

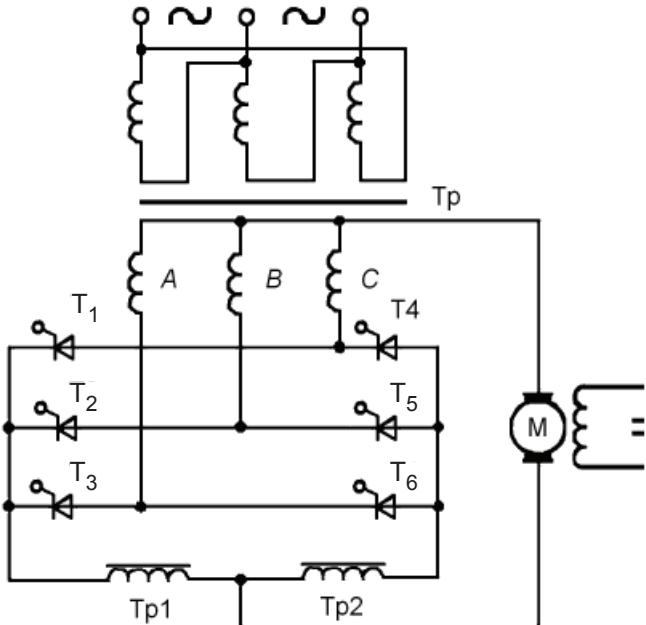


Рис. 6. Принципиальная схема выходного каскада тиристорного привода

Для управления ЭД постоянного тока успешно применяются тиристорные преобразователи. Функциональная схема тиристорного привода, представленная на рис. 5, включает тиристорный выходной каскад ВК, блок управления тиристорами БУ, системы формирования импульсов СФ, регулятор тока РТ, регулятор скорости РС, блок логики БЛ и датчик тока ДТ. Сигнал рассогласования после прохождения через РС и РТ поступает в СФ, где сигналы постоянного тока преобразуются в многофазную (по количеству силовых тиристоров) последовательность импульсов. Частота импульсов соответствует частоте сети питания. Полученные импульсы поступают в БУ, в котором осуществляется гальваническая развязка между предварительными цепями и цепями управления тиристоров.

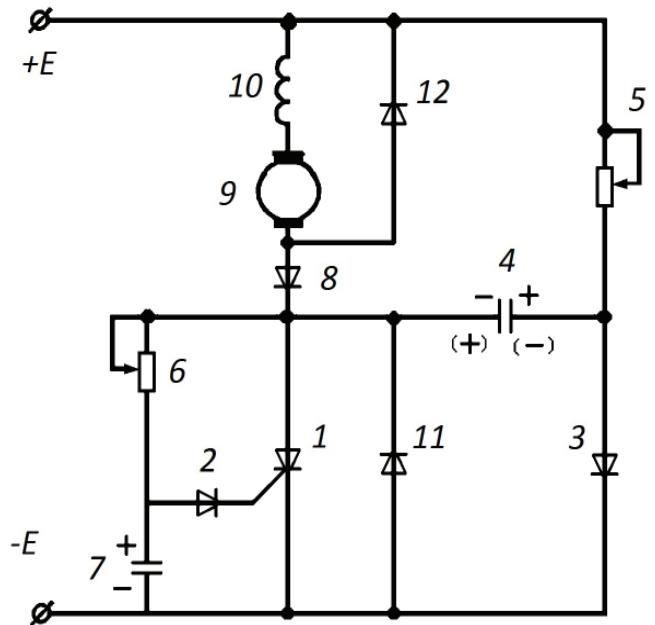


Рис. 7. Схема устройства управления электродвигателем постоянного тока

Принципиальная схема ВК (рис. 6) состоит из силового трёхфазного трансформатора Тр, а также двух групп тиристоров (T_1-T_3 и T_4-T_6).

БУ подключается к одной из тиристорных групп, причём управление осуществляется сигналом рас-согласования, поступающим через РС в БЛ (см. рис. 5). Сигнал обратной связи по току, поступающий на входы РТ и БЛ, определяется ДТ.

Частота вращения ротора ЭД постоянного тока регулируется сравнением величин заданного напряжения и напряжения обратной связи. Уровень величины напряжения рассогласования определяет угол открытия тиристоров.

Разработано устройство [2] для управления ЭД постоянного тока, в котором осуществляется частотно-широтная модуляция. Схема устройства (рис. 7) содержит силовой тиристор I , откры-

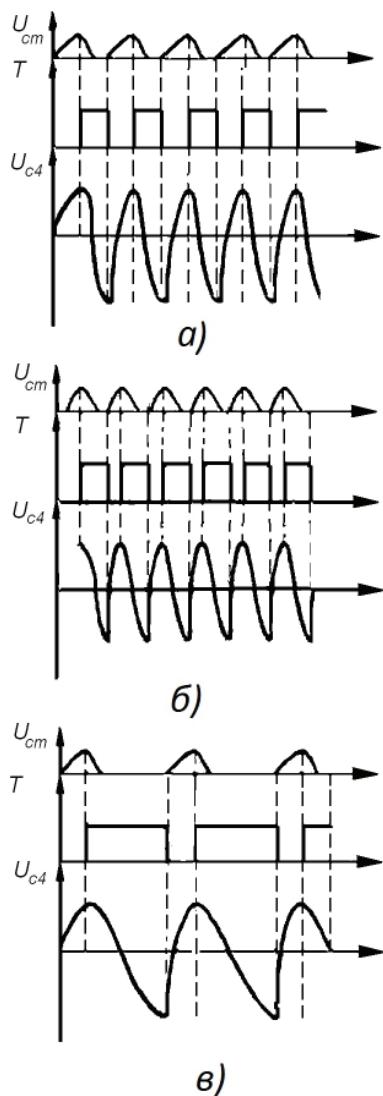


Рис. 8. Временные диаграммы устройства управления электродвигателем постоянного тока

тие и закрытие которого осуществляются с помощью открывающего 2 и закрывающего 3 динисторов, коммутирующего конденсатора и других элементов.

При подаче напряжения питания заряжаются конденсаторы 4 и 7 по цепям: $+E_n$ – «плюс» источника питания, 10 – обмотка ЭД, 9 – ЭД, 8 – диод, 4 – конденсатор, 3 – динистор; $-E_n$ – «минус» источника питания, 10 – обмотка ЭД, 6 – резистор, 7 – конденсатор. Постоянную зарядку конденсатора 7 можно регулировать переменным резистором 6. При достижении на конденсаторе 7 напряжения, равного напряжению включения динистора 2, последний включается и открывает силовой тиристор. Конденсатор 7 разряжается по переходу «управляющий электрод – катод» практически до нуля, а динистор 2 выключается. Открытый силовой тиристор 1 обеспечивает подачу на-

пряжения на обмотку 10 ЭД 9 постоянного тока, который начинает вращаться. Одновременно конденсатор 4 перезаряжается по цепи: $+E_n$, 5 – переменный резистор, 4 – конденсатор, 1 – силовой тиристор, $-E_n$. Постоянную времени перезарядки конденсатора можно регулировать переменным резистором 5. При достижении на конденсаторе 4 напряжения, равного напряжению включения динистора 3, последний включается и происходит перезарядка конденсатора 4 по цепи: (+) – правая обкладка конденсатора 4, 3 – динистор, 11 – диод, (-) – левая обкладка конденсатора 4. Силовой тиристор 1 закрывается. Конденсатор 4 возвращается в исходное положение, а динистор 3 выключается. Диод 8 не позволяет заряжаться конденсатору 4 до ЭДС вращения ЭД при выключенном силовом тиристоре 1.

Изменяя постоянную времени зарядки конденсатора 7 и оставляя постоянную времени перезарядки конденсатора 4 неизменной, можно изменить частоту включения ЭД (осуществляется частотная модуляция) (рис. 8, а, б). Если постоянную времени зарядки конденсатора 7 оставить неизменной, а изменять постоянную времени перезарядки конденсатора 4, то будет изменяться относительная продолжительность включения ЭД (осуществляется широтная модуляция) (рис. 8, в).

Если одновременно изменять постоянную времени зарядки конденсатора 7 и постоянную времени перезарядки конденсатора 4, то будет осуществляться частотно-широктная модуляция. Выбор соответствующего алгоритма изменения постоянных времени зарядки (перезарядки) конденсаторов 7 и 4 (т. е. сопротивлений резисторов 5 и 6) позволяет получить минимум потерь, связанных с дискретностью системы. Достоинством разработанного устройства являются жёсткие механические характеристики системы управления, обеспечивающиеся отрицательной обратной связью по ЭДС, которая осуществляется без использования дополнительных датчиков.

Напряжение на конденсаторе 7 определяется по формуле

$$U_C = \frac{1}{C} \int i dt,$$

где C – ёмкость конденсатора; i – ток зарядки конденсатора, определяющийся действием двух источников напряжения (источником питания E_n и ЭДС вращения двигателя), направленных навстречу друг другу.

При изменении частоты вращения ротора под действием нагрузки ЭДС вращения изменится, что приведёт к изменению момента открытия силового тиристора. Увеличение нагрузки умень-

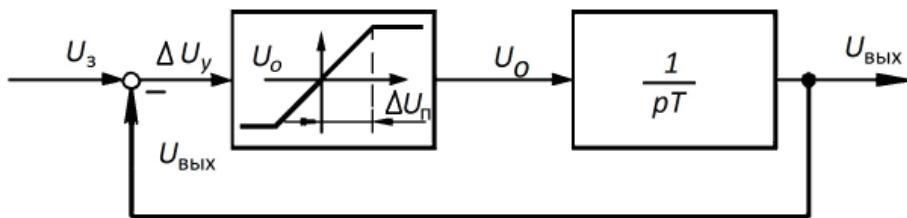


Рис. 9. Структурная схема аналогового задающего устройства

шает частоту вращения и, следовательно, ЭДС вращения. Конденсатор 7 будет заряжаться под действием большего напряжения. Силовой тиристор откроется раньше, что увеличит частоту подачи импульсов тока и восстановление требуемой частоты вращения.

ЭД постоянного тока имеют большую массу, однако простота регулирования частоты вращения ротора, а также возможность контроля движущего момента позволили использовать их в приводах перемещения и подъёма штабелёров.

Для высокой точности работы САУ и ограничения величины ускорения используют задатчики интенсивности (ЗИ), в качестве которых могут быть применены дискретные и аналоговые устройства. Аналоговые устройства менее точны, чем дискретные, но значительно проще. Основными элементами структурной схемы аналогового ЗИ (рис. 9) являются ограничивающие и интегрирующие звенья.

Принцип действия аналогового ЗИ основан на использовании интегратора в качестве устройства, определяющего временную функцию.

Передаточная функция задатчика определяется следующим режимом работы:

$$U_{\text{вых}} = U_{0 \max} \text{ при } \Delta U_y = (U_3 - U_{\text{вых}}) > \Delta U_{\Pi};$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_3}{T} = \frac{U_3}{pT' + 1} \text{ при } \Delta U_y < \Delta U_{\Pi},$$

где ΔU_y – приращение управляемого напряжения; U_3 – задающее напряжение, подаваемое скачком на вход ЗИ; $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе ЗИ; ΔU_{Π} – относительная величина порогового напряжения на выходе; $U_{0 \max}$ – предельное значение напряжения ограничения; T – постоянная времени интегрирования; $k = \frac{U_{0 \max}}{\Delta U_{\Pi}}$ – коэффициент передачи звена ограничения; p – оператор дифференциального уравнения.

Сигнал на вход ЗИ подаётся скачком по команде оператора или автоматической системой. ЗИ преобразует единичный входной импульс в изменяющееся в функции времени напряжение и

обеспечивает программирование скорости привода:

$$U_3 = k_1 U_0 = k_2 v,$$

где v – линейная скорость движения штабелёра; k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности.

Выбирая и изменяя напряжения U_3 , U_{Π} можно обеспечить любой режим изменения скорости. Для точного останова штабелёра торможение ЭД только электрическими методами недостаточно эффективно, поэтому необходимо использовать механический тормоз с достаточным быстродействием и необходимой величиной тормозного момента.

Рассмотрим привод передвижения крана-штабелёра (рис. 10, а), который включает ЭД постоянного тока 3 (или многоскоростной асинхронный электродвигатель) с дисковым тормозом 2 и тахогенератором 1, соединённый зубчатой муфтой 4 с редуктором 5. Выходной вал редуктора соединён с валом приводного колеса 9. Мотор-редуктор крепится болтами к подвижной плате 7, которая через амортизирующие втулки 10 соединена с базовой рамой. Вал 6 ЭД вращается в радиально-упорных подшипниках 8. Привод подъёма штабелёра (рис. 10, б) включает мотор-редуктор 1 (как правило, на основе многоскоростного АД), передающего движение выходному валу 4 через зубчатую муфту 2. Вал имеет шестерню 3 с приводной цепью. Выходной вал установлен в радиально-упорных подшипниках 5.

Поперечный привод захватного устройства штабелёра содержит двухскоростной АД, предохранительную муфту и редуктор, которые закреплены на раме. Выходной вал редуктора соединяется с подвижным элементом захватного устройства.

Система подвода электроэнергии к крану-штабелёру должна занимать мало места, а провода цепей управления иметь абсолютную защиту от электропомех и вибраций; кабель, идущий от места подключения к крану-штабелёру, должен быть гибким и защищённым от разрыва. Температура окружающего воздуха, при которой используется кабель, может колебаться от -30°C (склады-холодильники) до $+60^{\circ}\text{C}$ (склады-навесы

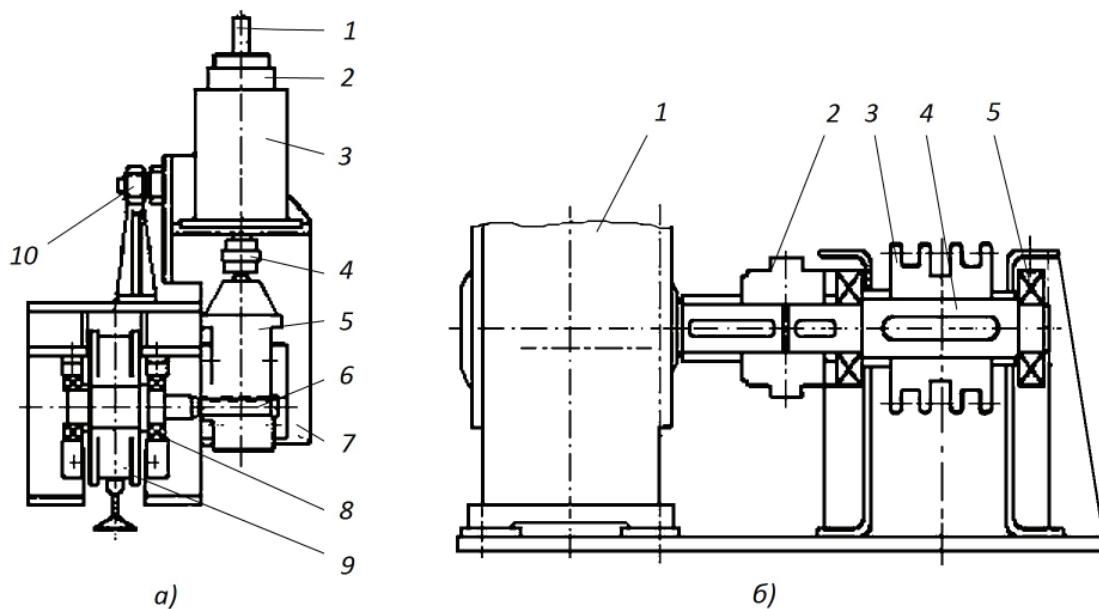


Рис. 10. Привод передвижения (а) и подъёма (б) штабелёра

в южных районах РФ). На САУ штабелёра не должны воздействовать влажность и высокое содержание пыли в воздухе. Все эти требования необходимо соблюдать при проектировании подвижных элементов электропривода.

При конструировании системы подводки электроэнергии к крану-штабелёру следует также учитывать:

скорость перемещения крана-штабелёра и максимальное ускорение при его трогании с места и останове;

площадь в месте подвода тока, предусмотренную для подвески кареток с кабелем, и максимально допустимое провисание шлейфа;

траекторию движения крана-штабелёра с учётом её возможного удлинения в будущем;

мощность и напряжение ЭД крана-штабелёра для передвижения по горизонтали и подъёма каретки, требуемое количество жил кабеля для питания ЭД, сечение кабеля, род тока (переменный или постоянный); необходимое число жил в кабеле для управления, вид прокладки кабеля.

Таким образом, проведённый анализ систем привода подъёмно-транспортными механизмами, в частности кранами-штабелёрами, позволяет обоснованно выбрать двигатель и систему регулирования для конкретного подъёмно-транспортного механизма. Разработанная схема импульсного регулирования частоты вращения ротора ЭД, использующая частотно-широкую модуляцию, обладает рядом достоинств по сравнению с известными аналогами.

Разработанные приводы внедрены на изготовленных кранах-штабелёрах различной грузоподъёмности.

Библиографические ссылки

1. Антонец И.В. Оптимальное управление краном-штабелёром по критерию максимальной производительности // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 10. С. 12–16.

2. Антонец И.В., Полянков Ю.В., Табаков В.П. Основы проектирования технических средств автоматизации поточного и циклического внутриводского транспорта. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 341 с.

УДК: 681.2:682.9

А.А. Ашрятов, канд. техн. наук, доц., **А.Б. Мышонков** (Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск), **С.А. Микаева**, д-р техн. наук (Московский государственный университет приборостроения и информатики)

mikaeva@pechkin.npo.lit.ru

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛА МАЛОМОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ

Рассмотрен метод измерения тепловых характеристик кристалла светодиода, основанный на зависимости электрических параметров от температуры. Описана установка для проведения автоматических измерений температуры кристалла работающих светодиодов. Приведены результаты измерений динамики разогрева и остывания кристаллов при различных токах.

Ключевые слова: светодиод, температура кристалла, температурный коэффициент напряжения, динамика разогрева, тепловое сопротивление.

Measuring method of the light-emitting diode (LED) crystal thermal behavior based on the electrical characteristic dependence from temperature is considered. Facility for automatic measuring accomplishment of the working LED crystal is described. Measuring results of the crystals reheating and cooling-down by different current are adduced.

Key words: LED, crystal temperature, temperature tension coefficient, reheating dynamics, thermal resistance.

Высокие темпы развития светодиодов (СД) привели к созданию изделий, предназначенных для освещения. Но дальнейшее увеличение светового потока ограничивается низкой мощностью излучающего кристалла, который работает на определённом напряжении 2–3 В. Единственной возможностью повышения мощности одиночного кристалла является увеличение проходящего через него тока, что может быть достигнуто двумя способами – либо увеличением размеров кристалла либо увеличением плотности тока при прохождении через кристалл. При больших размерах кристалла снижается его эффективность за счёт повышения поглощения излучения в кристалле, а также растёт стоимость изделия. Повышение плотности тока также приводит к снижению эффективности за счёт нагрева кристалла. Максимальное значение плотности тока ограничивается предельной температурой кристалла, при которой начинается его значительная деградация, при больших температурах может произойти разрушение корпуса светодиода.

В светодиодах источниками тепла являются активная область кристалла, токопроводящие слои структуры, омические контакты к кристаллу. При малых значениях тока основным источником тепла является активная область, которая нагревается за счёт безызлучательной рекомбинации. При высоких значениях тока доля тепла, выделяющегося на контактах и во внешних слоях кристалла, значительно увеличивается.

Температура кристалла влияет практически на все характеристики светодиодов: срок службы, светотехнические, электрические характеристики, характеристики световой и энергетической эффективности. Причинами изменения температуры могут выступать как внутренние, так и внешние факторы. К внутренним факторам можно отнести нагрев кристаллов протекающим током, поглощение излучения в кристалле; к внешним — изменение окружающей температуры, тепловых условий работы светодиода. Исходя из большого влияния температуры на работу светодиода возникает необходимость контролировать изменение температуры при различных режимах работы.

Для малоомощных светодиодов измерение температуры кристалла является сложной задачей вследствие небольших размеров и невысокой температуры кристалла. Контактные методы здесь неприменимы, поэтому целесообразны косвенные методы измерения. Ниже приведён их краткий обзор.

Метод прямых напряжений основан на зависимости электрических параметров светодиода от температуры активной области кристалла и позволяет на основе измеренного температурного коэффициента напряжения (ТКН) определить температуру кристалла с погрешностью $\pm 3^{\circ}\text{C}$ [1, 2]. По другому методу, температура $p-n$ -перехода определяется по изменению спектра свечения светодиода, а именно по смещению спектрального максимума излучения в область коротких длин

волн при повышении температуры. Но данный метод менее точен, и измерение связано с усложнением эксперимента [3].

Ещё один метод основан на применении рамановской спектроскопии, с помощью которой может быть определена температура различных слоёв структуры. Точность невысокая и составляет порядка $\pm 10^{\circ}\text{C}$ [4]. Для светодиодов, у которых в качестве подложки используется сапфир, температура может быть определена с помощью оптического измерения длин волн линий, излучаемых хромом Cr^{3+} , который находится в подложке в виде примеси. Для измерений используют две красные линии, которые смещаются в длинноволновую область при повышении температуры [5]. Из приведённых методик определения температуры кристалла светодиода оптимальным является метод прямых напряжений, который позволяет проводить серии экспериментов на простом оборудовании и с достаточно высокой точностью.

Метод прямых напряжений основан на изменении электрических параметров полупроводниковых структур при изменении температуры. Суть его заключается в том, что первоначально производится калибровка – измеряются импульсные вольт-амперные характеристики светодиода, помещённого в печь с заданной температурой. При этом за время короткого импульса не происходит разогрев кристалла протекающим током, соответственно температура кристалла определяется температурой печи.

На основе измеренных значений напряжения и тока при различных температурах печи была установлена зависимость электрических параметров от температуры, которая используется для расчёта температуры кристалла работающего светодиода. В качестве измерительного прибора применена универсальная плата расширения для персонального компьютера NI PCI-6251 (АЦП–ЦАП), с помощью которой задавались токи питания светодиода и проводились измерения их характеристик. Плата подключается к компьютеру через слот PCI, в ней имеются восемь дифференциальных каналов для измерения напряжения с максимальной частотой оцифровки 1,25 МГц, точностью 16 бит, диапазоном измеряемых напряжений $-10 \dots 10$ В; два канала аналогового вывода с максимальной частотой 2,86 МГц, разрешением 16 бит, интервалом напряжений $-10 \dots 10$ В; 24 канала цифрового ввода/вывода с частотой до 10 МГц; два счётчика импульсов с частотой до 80 МГц. Параметры платы позволяют задавать напряжение питания светодиодов и измерять его с высокой точностью, но её недостатком является невозможность прямого измерения тока. Ток можно определить только с помощью прецизионного безындукционного резистора по закону Ома, включённого последова-

тельно со светодиодом. Номинал резистора должен быть выбран исходя из максимального напряжения питания U_s , рабочего тока светодиода I , напряжения на светодиоде U_{cd} . В рассматриваемом случае для рабочего тока светодиода $I = 20$ мА и напряжения на светодиоде $U_{\text{cd}} = 3$ В получим приблизительное значение сопротивления резистора:

$$R = U/I = (U_s - U_{\text{cd}})/I = (10 - 3)/0,020 = 350 \text{ Ом.}$$

Стабилизация тока выполняется программно путём измерения тока цепи с последующей корректировкой напряжения питания. Благодаря высокому быстродействию стабилизация получается удовлетворительной.

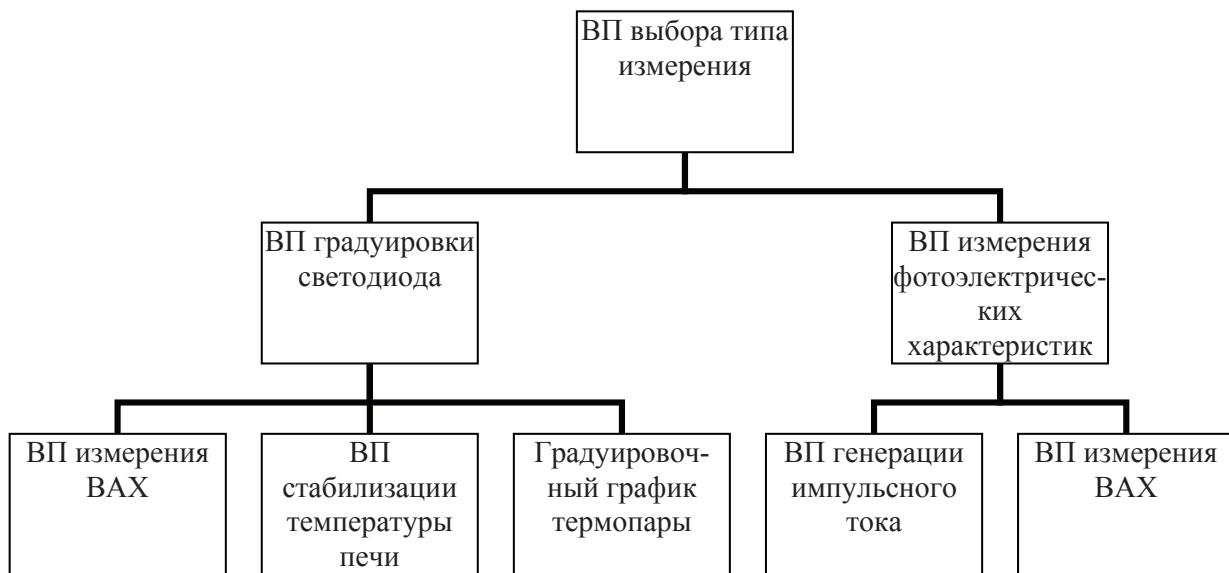
Измерение температуры внутри печи производится отградуированной термопарой «меди–константан». Нагрев осуществляется посредством пропускания тока, регулируемого на основе измеренных значений температуры. Осевая сила света светодиода измеряется с помощью фотодиода.

В работе использовался программный комплекс LabView, который был разработан для исследовательских целей. По внешнему виду приложения во многом сходны с обычными измерительными приборами, поэтому программы и подпрограммы в данном комплексе называют виртуальными приборами (ВП). Для проведения исследований температуры кристалла светодиода была разработана программа, состоящая из нескольких взаимосвязанных ВП. Блок-схема программы приведена на рисунке.

ВП выбора типа измерения определяет производится калибровка светодиода или измерение его температуры, задаёт основные параметры и число измерений каждого типа. ВП температурной калибровки светодиода регулирует температуру печи и измеряет импульсные ВАХ светодиода. Температура печи изменяется от 20 до 120°C с шагом 10°C . Предварительные исследования показали, что стабилизация температуры при изменении её на 10°C происходит в течение 15 мин. Для уменьшения погрешности измерения производят при увеличении и снижении температуры с последующим усреднением результатов, которые записываются в файл для последующей обработки. По полученным результатам строится калибровочный график зависимости напряжения на светодиоде U от температуры кристалла T при постоянном токе, который описывается уравнением прямой вида

$$T = kU + b,$$

где k , b – коэффициенты различные для каждого светодиода, причём $k < 0$.



Эти коэффициенты используют для расчёта температуры кристалла по измеренному значению напряжения светодиода при заданном токе.

ВП стабилизации температуры регулирует ток нагрева печи в зависимости от температуры, измеренной с помощью термопары. ВП измерения ВАХ за время короткого импульса устанавливает заданную величину тока светодиода и производит измерение напряжения на светодиоде и силы света светодиода путём измерения фототока фотодиода. Отдельно данный прибор не используется, он является элементом других ВП. Для питания светодиода сигналами с различной формой кривых тока применяется ВП генерации импульсного тока, для которого задаются параметры сигнала (частота, скважность, тип кривой, амплитудное значение тока, длительность). Данный ВП самостоятельно не используется, а служит для исследований динамики разогрева кристалла светодиода, который в течение заданного времени питается током с выбранными параметрами. Для определения изменения температуры кристалла в процессе работы светодиода используется ВП измерения фотоэлектрических характеристик, входными данными для которого являются параметры сигнала, число циклов измерений, интервал между измерениями.

В начале работы прибора создаётся файл с описанием измерения, вслед за этим проводится измерение фотоэлектрических характеристик «холодного» светодиода, затем производится его саморазогрев протекающим током (задаётся с помощью ВП генерации импульсного тока) с периодическим измерением фотоэлектрических характеристик. Массив результатов измерений за-

писывается в файл. На основе данных калибровки производится переход от электрических характеристик к температуре. Таким образом, получаем зависимость температуры кристалла от времени саморазогрева.

Используя описанную установку, были проведены косвенные измерения динамики саморазогрева и остывания кристалла при пропускании через него постоянного и импульсного тока различных скважностей q с частотой $f = 1\text{кГц}$. В исследованиях применялись светодиоды синего цвета в стандартном пластиковом корпусе диаметром 10 мм.

Для сравнения процессов разогрева и последующего остывания кристалла измерялся его саморазогрев током 30 мА с последующим определением динамики остывания. Длительность процессов разогрева и остывания составила одну минуту, интервал между измерениями — три секунды.

Электрическая мощность, подводимая к кристаллу, рассеивается в результате излучения и теплопроводности. Практически всё излучение светодиода сосредоточено в видимой области спектра. Количество тепла, отводимой от светодиода при излучении, является коэффициентом полезного действия светодиода η , который равен отношению энергии излучения светодиода к подводимой электрической энергии. Для светодиодов исследуемого типа $\eta = 0,05$.

Теплопередача в светодиодах данного типа происходит преимущественно через токовый ввод, к которому крепится кристалл, поскольку пластиковый корпус плохо отводит тепло. Учи-

Зависимость параметров кристалла от типа тока и скважности

| Показатель | Постоянный ток | Скважность, q | | | |
|---|----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| | | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| Температура кристалла, °C | 51,0 | 43,2 | 39,5 | 37,8 | 36,5 |
| Разность температуры кристалла и температуры окружающей среды, °C | 21,5 | 13,7 | 10,0 | 8,3 | 7,0 |
| Электрическая мощность $P = IU$, Вт | 0,070 | 0,047 | 0,035 | 0,028 | 0,023 |

тывая, что энергия, подводимая к кристаллу с помощью тока, отводится только за счёт излучения и теплопроводности, можно записать, что мощность, рассеиваемая в виде тепла, составляет

$$P = (1-\eta)W,$$

где W — электрическая мощность, подводимая к кристаллу, $W = IU$.

Тепловое сопротивление Θ_{j-a} между активной областью и окружающей средой определяется разностью их температур ΔT_{j-a} и тепловым потоком P — тепловой мощностью, подводимой от кристалла:

$$\Theta_{j-a} = \frac{\Delta T_{j-a}}{P} = \frac{\Delta T_{j-a}}{(1-\eta)W}.$$

Разность температуры кристалла и температуры окружающей среды составила $\Delta T_{j-a} = 24,9$ °C; подводимая мощность $W = IU = 0,03 \cdot 3,28 = 0,098$ Вт. Исходя из этих значений можно определить тепловое сопротивление между активной областью кристалла и окружающей средой:

$$\Theta_{j-a} = \frac{\Delta T_{j-a}}{P} = \frac{\Delta T_{j-a}}{(1-\eta)W} = \frac{24,9}{(1-0,05)0,098} = \\ = 267,5 \text{ K/Bт.}$$

Величина теплового сопротивления $R_{j-a} = 267,5$ К/Вт является типичной для светодиодов данного типа, что свидетельствует о корректной работе установки.

Получены зависимости температуры кристалла от времени при протекании через кристалл постоянных и импульсных токов частотой $f = 1$ кГц при различных скважностях q . При питании постоянным током 22 мА и импульсными токами амплитудой 22 мА частотой 1 кГц устанавливаются значения температуры, приведённые в таблице.

Для сравнения в таблице приведены значения температуры кристалла, электрической мощно-

сти, подводимой к кристаллу, и разность температуры кристалла и температуры окружающей среды ($T_{\text{окр.ср.}} = 29,5$ °C).

Проанализировав значения температуры и сравнив их с величиной вложенной мощности, можно сделать вывод, что для импульсного тока частотой 1 кГц наблюдается прямая зависимость между мощностью, подводимой к кристаллу, и температурой кристалла, что соответствует уравнению теплового баланса.

Наиболее простым и достаточно точным методом измерения температуры кристалла является метод прямых напряжений. Для массовых измерений в производстве светотехнической продукции может быть использовано типичное значение температурного коэффициента напряжения светодиода, который варьируется, но погрешность, вносимая технологическим разбросом параметров, можно принять допустимой. Для более точных измерений необходимо осуществлять калибровку каждого светодиода. Полученные измерения показали соответствие экспериментальных и теоретических данных, что позволяет применять данный метод для измерения температурных и электрических характеристик светодиодов на описанном оборудовании и с использованием разработанной программы.

Библиографические ссылки

1. **Xi Y., Shubert E.F.** Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method: Appl.Phys. Lett. 2004. Vol. 85. P. 2163.
2. **Ефремов А.А.** Исследование эффективности $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ светодиодов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: 2005. 104 с.
3. **Шуберт Ф.Е.** Светодиоды: Пер. с англ. / Под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
4. **Kuball M., Pajasingam S., Sarua A. et al.** Self-Heating effects at high Pump Currents in Deep UV LED: Appl. Phys.Lett., 2003. Vol.82. P.124.
5. **Winewisser C., Schneider J.** In-situ temperature measurements via ruby R-lines of sapphire substrate based In-GaN light emitting diodes during operation: J. Appl. Phys. 2001.Vol. 89. P. 3091.

УДК 621.981

С.В. Филимонов, канд. техн. наук, **В.И. Лапшин** (ООО «Спецтехнология», г. Ульяновск),
В.В. Лапин, В.И. Филимонов, д-р. техн. наук, проф.
(ОАО «Ульяновский механический завод»)

fwiumz@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМОВКИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ЗАМКНУТОГО ПРОФИЛЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ДВОЙНОЙ ТОЛЩИНЫ

Рассмотрены основные этапы разработки формовки методом интенсивного деформирования многоэлементного замкнутого профиля с элементами двойной толщины, приведена схема формообразования и конструкция формующей оснастки.

Ключевые слова: замкнутый профиль, профилирование, элемент двойной толщины, формовка, теплица.

Basic development phases of the molding by intensive deform of the multiple-unit enclosed shape with double thickness components are considered; shaping scheme and mold fittings construction are adduced.

Key words: enclosed shape, shaping, double thickness component, molding, greenhouse.

В последние годы развитие производства гнутых профилей имеет тенденцию к стремительному росту в связи с разработкой новых материалов с покрытием и широким применением гнутых профилей в строительстве и машиностроении.

Многоэлементные гнутые профили изготавливают на профилировочных станках традиционным многопереходным профилированием ленты, используя метод интенсивного деформирования (МИД) и в редких случаях – метод стесненного изгиба. МИД базируется на регулируемой знакопеременной продольной деформации подгибаемых элементов профиля во избежание потери их устойчивости, реализуется в закрытых роликовых калибрах и требует в 1,5 – 2 раза меньше переходов, чем традиционное профилирование [1]. Сокращение числа переходов является существенным преимуществом для условий мелкосерийного или разового выпуска партии профилей. Вместе с тем разработка технологии производства специальных, в частности, закрытых профилей с элементами двойной толщины, представляет собой далеко не тривиальную задачу.

В статье рассмотрены особенности разработки технологии производства закрытых профилей на примере замкнутого профиля для теплиц со стенками двойной толщины, изготавливаемого по полузакрытой схеме. Профиль, используемый в качестве дуг теплиц, имеет сечение, показанное на рис. 1.

Разработка технологии предполагает решение следующих задач: предварительное определение числа переходов, выбор базового элемента профиля (или оси профилирования) и расположение окончательного сечения профиля в роликах по-

следней пары, определение принципа формовки, разработка схемы формообразования, расчёт протяжённости зоны плавного перехода, определение мер предотвращения потери устойчивости элементов профиля, уточнение числа переходов и выбор профилировочного оборудования, определение видов замыкания калибров, проектирование и изготовление технологического оснащения, отработка технологии и определение режимов формообразования профиля.

Число переходов. Для замкнутых многоэлементных профилей произвольного типоразмера модели числа переходов отсутствуют. Следует отметить, что в технологии традиционного профилирования для изготовления полузакрытого профиля окантовки гаражных дверей высотой около 20 мм из ленты толщиной 0,5 мм используют от 30 до 33 технологических переходов [2], причём уровень сложности этого профиля несколько ниже, чем уровень сложности профиля, приведённого на рис. 1. Даже для сравнительно простого полузакрытого профиля для автомобилестроения высотой 20 мм и толщиной стенок 0,5 мм с

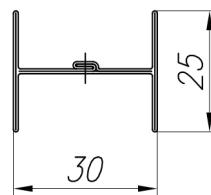


Рис. 1. Конфигурация замкнутого многоэлементного профиля с элементами двойной толщины из стали 08kp толщиной 0,5 мм

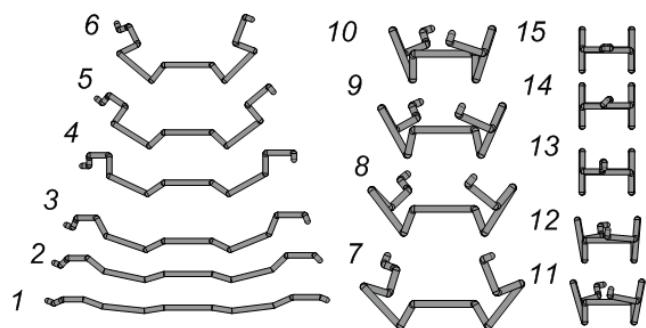


Рис. 2. Схема формообразования профиля:
1 – 15 – конфигурация сечения заготовки на пятнадцати технологических переходах

одним элементом двойной толщины, изготавливаемого традиционным профилированием, требуется 18 технологических переходов [2].

Предварительный выбор числа переходов для изготовления рассматриваемого профиля основан на анализе эквивалентной конфигурации С-образного профиля с локальными элементами жёсткости, для формовки которого требуется семь–восемь переходов [1]. Последующие четыре–пять переходов необходимы для замыкания эквивалентной конфигурации и приведения её к Н-образной форме. Последние три–четыре перехода требуются для формовки замкового элемента. По предварительной оценке, базовое число должно составлять 16 переходов, что также соответствует имеющемуся оборудованию – универсальному профилировочному модульному станку СПУ-400К16×50 разработки ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск).

Выбор оси профилирования и расположение окончательного сечения профиля в роликах. В отличие от традиционного профилирования, где ось профилирования располагают обычно по центру тяжести сечения профиля в каждом из переходов при использовании МИД, ось профилирования имеет привязку к точке, подверженной наименьшему перемещению. На рис. 2 видно, что срединный элемент профиля (элемент будущей горизонтальной стенки) не подвергается формовке ни в одном из переходов. Следовательно, данный элемент принимается в качестве базового в схеме формообразования (см. рис. 2). При этом ось профилирования должна проходить через срединную поверхность заготовки и лежать в вертикальной плоскости, проходящей через середину указанного элемента. Данный выбор оси профилирования и базового элемента позволяет вести формовку по открытой схеме на первых четырёх переходах, а на последующих переходах – минимизировать суммарные углы подгибы элементов. Небольшая асимметрия сечений калибров может быть скорректирована углами подги-

ки элементов справа и слева от базового элемента. Специальные меры предотвращения скрутки профиля не требуются.

Принцип формовки. В методе интенсивного деформирования принимается принцип параллельной формовки элементов профиля в отличие от традиционного профилирования, где весьма часто применяется принцип последовательной формовки, приводящий к завышенному числу переходов [2]. Следует иметь в виду, что в МИД конечные радиусы изгиба задаются практически в первом переходе. В редких случаях (например, при формовке рифтов в донной части профиля) окончательное задание радиусов зон изгиба откладывается на последующие переходы. Как видно на рис. 2, зоны изгиба профиля формуются с первого перехода, а на последующих переходах лишь изменяются углы подгибы элементов.

Разработка схемы формообразования. Разработанная и приведённая на рис. 2 схема формообразования отличается тем, что ось профилирования делит заготовку примерно пополам, а монотонная подгибка по углу крайних полок с элементами жёсткости даёт им примерно равную продольную деформацию в каждом из переходов. Указанные продольные деформации несколько уменьшаются за осевой плоскостью роликов вследствие эффекта «жёсткого конца», регулируемого соотношением диаметров роликов соседних переходов [1].

Небольшая глубина формовки (максимальные значения достигаются на шестом и седьмом переходах) позволяет применять формующие ролики небольших диаметров, в основном в пределах 100 мм. Схема максимально приближена к схеме открытой формовки, а углы подгибы определены с тем расчётом, чтобы обеспечивалась достаточная жёсткость подгибаемых полок во избежание их излома из-за «набегания» продольных деформаций. Расчёты углов подгибы проведены на основе метода локальных жёсткостей [1], а их распределение по переходам представлено на рис. 3. С принципом формовки и схемой формообразования тесно связана процедура расчёта ширины заготовки, учитывающая утонение заготовки.

Ширина заготовки. Теоретическая длина развертки поперечного сечения готового профиля по средней линии определяется из выражения

$$B_T = \sum_{i=1}^{n+1} B_i^R + \sum_{j=1}^n B_j^C, \quad (1)$$

где B_i^R , B_j^C – длина прямолинейного и криволинейного участков соответственно, мм; n – число зон изгиба профиля.

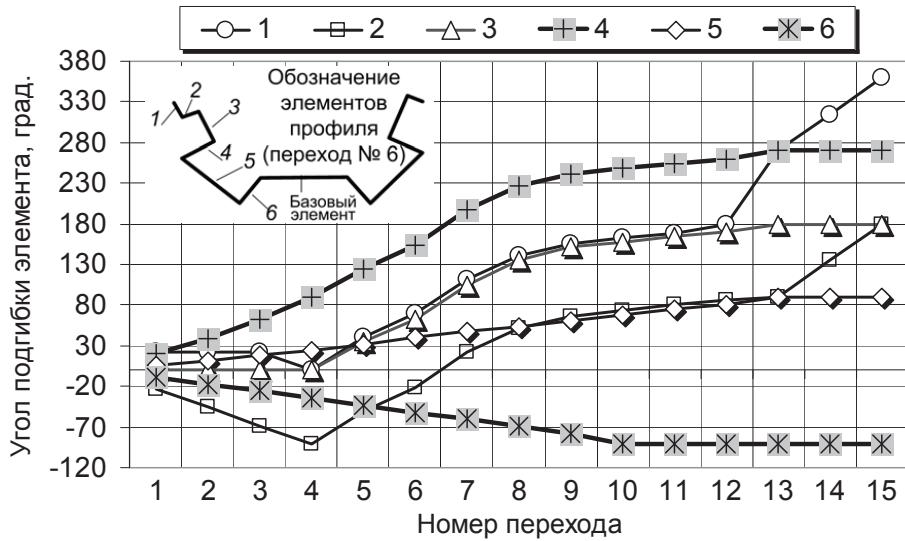


Рис. 3. Распределение углов подгиба элементов по переходам в схеме формообразования профиля:
1 – 6 – номера элементов профиля

Длина j -го криволинейного участка определяется зависимостью

$$B_j^C = \frac{\pi\alpha}{180^\circ} (r_j + s/2). \quad (2)$$

С использованием формул (1) и (2) ширину заготовки для профилирования определяют по формуле

$$B_{\text{в}} = B_{\text{т}} + \Delta B,$$

где ΔB – приращение заготовки, которое рассчитывается алгебраически в зависимости от схемы формообразования.

Если на ряде переходов применяется подсадка заготовки (торцевое сжатие), то слагаемые, входящие в расчётную формулу для определения ΔB , берут со знаком «плюс». Если же формообразование осуществляется в условиях растяжения, то соответствующие слагаемые берутся со знаком «минус». В рассматриваемой схеме формообразования доминирует схема с растяжением, а расчёт указанного приращения основывается на зависимости

$$\Delta B = -\frac{S}{\pi\sqrt{2}} \left(\frac{\sigma_{\text{т}}}{\sigma_{\text{в}}} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(\alpha_i \frac{r_i + 1/2}{\sqrt{2r_i^2 + 2r_i + 1}} \right), \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$ – предел текучести и предел прочности материала заготовки соответственно; α_i – суммарный угол подгиба i -й угловой зоны; r_i – относительный радиус изгиба i -й угловой зоны.

Расчёт по формуле (3) даёт значение приращения ширины заготовки 1,8 мм. При некорректном расчёте ширины заготовки невозможно получить кондиционный профиль, даже если все другие составляющие технологии выполнены безукоризненно.

Расчёт протяжённости зоны плавного перехода. Расчёт выполнен для периферийных подгибаемых элементов каждого из переходов в соответствии с моделью зоны плавного перехода работы с применением метода локальных жёсткостей [3]. Полученный результат для каждого из переходов сравнивали с межклетьевым расстоянием профилировочного оборудования. Протяжённость зоны плавного перехода не должна превышать значение межклетьевого расстояния станка во избежание переформовки элементов профиля. По данным расчётов, протяжённость зон плавного перехода всех переходов не превышала межклетьевого расстояния профилировочного станка.

Меры предотвращения потери устойчивости элементов профиля. Специальных и всеобъемлющих критериев потери устойчивости элементов при профилировании пока не существует. В общем случае для оценки потери устойчивости можно использовать модель, в которой потеря устойчивости прогнозируется индикаторной функцией [3]. В данном случае методом локальных жёсткостей многоэлементные подгибаемые полки редуцируются к гладким полкам эквивалентной толщины, к которым можно применять указанный выше критерий. Однако для рассматриваемого профиля жёсткость подгибаемых многоэлементных полок оказывается достаточной для обеспечения устойчивости деформирования. На

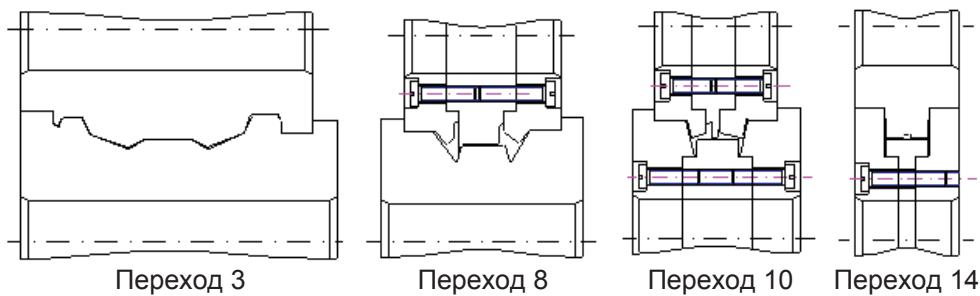


Рис. 4. Конструкция валковой арматуры для различных технологических переходов:

переход 3 – цельная конструкция формующих роликов; переход 8 – цельная конструкция нижнего ролика и сборная конструкция верхнего ролика; переход 10 – сборная конструкция обоих роликов; переход 14 – цельная конструкция верхнего ролика и сборная конструкция нижнего ролика

периферийных участках заготовки имеются элементы жёсткости в виде отбортовок, гарантирующие отсутствие кромковой волнистости.

Уточнение числа переходов и выбор профилировочного оборудования. Иногда разработка схемы формообразования вызывает необходимость увеличения или сокращения первоначально определённого числа переходов. Это может возникать как из-за погрешностей модели и процедуры приведения сечения профиля к типовой конфигурации, так и вследствие издержек на уровне определения положения сечения профиля в роликах, разработки схемы формообразования и предварительного определения режимов формообразования. В этой связи перед выбором профилировочного оборудования уточняют число переходов, а при разработке схемы формообразования под наличное оборудование с ограниченными возможностями предусматривают ряд дополнительных мер [1].

Применительно к разработанной схеме формообразования (см. рис. 2 и 3) можно считать пригодным модульный станок «среднего типа» [4], обладающий достаточной мощностью, приемлемой длиной валов, подходящим межосевым и межклетевым расстоянием.

Определение вида замыкания калибров. Данный вопрос достаточно подробно изложен в работе [5]. Ограничимся лишь указанием на то, что для рассматриваемого профиля применяется замыкание по горизонтальным и вертикальным линиям разъёма с двусторонним «врезанием» и геометрическим замыканием валов.

Проектирование и изготовление технологического оснащения. Проектирование технологического оснащения на основе разработанной схемы формообразования требует специальных знаний в области профилирования, относящихся как к процессу формообразования, так и к процессам изготовления формующих роликов. В частности, формующие ролики в ряде переходов необходи-

мо выполнять сборными (рис. 4), что связано с обеспечением надлежащих условий формовки и с возможностью использования стандартного режущего инструмента.

Отработка технологии и определение режимов формообразования. В результате отработки технологии было установлено, что наилучшие результаты профилирования достигаются при отключённых верхних валах клетей некоторых переходов, что связано с условиями замыкания роликовых калибров. Геометрические характеристики сечения были выдержаны в пределах заданных допусков, отклонения углов не превышали $\pm 1^\circ$ (требования по чертежу). Серповидность, продольная кривизна и скрутка отсутствовали (допуски по чертежу: 1 мм/м, 1 мм/м и $1^\circ/\text{м}$ соответственно). На рис. 5 представлены образцы полученного профиля, причём на рис. 5, б показан профиль с повышенной жёсткостью стенки, обеспечивающей специальным устройством, установленным в шестнадцатой клети станка.

Технология реализована на базе автоматизированной линии «среднего типа» производства ООО «Спецтехнология», включающей рулонницу, про-



Рис. 5. Образцы готовых профилей, изготовленных по разработанной технологии:

1 – замкнутый профиль с гладкими полками;
2 – профиль с повышенной жёсткостью стенки

фирировочный станок, отрезное устройство и систему управления. Технология и оборудование внедрены на площадях заказчика и успешно эксплуатируются.

В данной работе особенности разработки технологии производства многоэлементного профиля рассмотрены в основном на качественном уровне. Некоторые вопросы не рассматриваются из-за их малого значения для данного профиля (например боковой утяжки, учёта пружинения и др.). Тем не менее некоторые весьма полезные выводы и рекомендации позволяют избежать серьёзных ошибок в разработке технологии профилирования, влекущих за собой существенные финансовые потери.

Выводы. При разработке технологии производства многоэлементных профилей предварительный расчёт числа переходов следует производить после приведения конфигурации профиля к сечению профиля типовой номенклатуры на основе модели расчёта числа переходов, разработанной авторами. Вертикальная плоскость, содержащая ось профилирования, должна делить заготовку примерно на равные части. Следует отдавать предпочтение параллельной схеме формовки.

Схема формообразования должна гарантировать равенство продольных деформаций подгibaемых полок и обеспечивать двусторонний доступ инструмента к заготовке на возможно большем числе переходов, а также точность формовки элементов профиля. Пригодность схемы формообразования следует осуществлять расчётом протяжённости зоны плавного перехода с целью предупреждения переформовки профиля.

Для предотвращения потери устойчивости элементов профиля необходимо осуществлять корректировку схемы формообразования в части пересмотра углов подгиба на основе соответствующих расчётов и использовать при необходимости натяг профиля, межклетьевые проводки и т. д.

Выбор вида замыкания калибров следует производить на основе разработанного авторами классификатора замыканий роликового калибра, предпочтая геометрическое замыкание силовому. В необходимых случаях рекомендуется использовать сборную оснастку. Режимы формообразования (настройка калибров, правильного устройства, схемы привода клетей) должны выбираться с учётом схем формообразования и получаемого качества профиля при отработке.

Библиографические ссылки

1. Филимонов С.В., Филимонов В.И. Интенсивное формообразование гнутых профилей. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2008. 444 с.
2. Roll Forming Handbook / Edited by J.T. Halmos. Boca Raton: CRC Group, 2006. 583 р.
3. Филимонов С.В., Филимонов В.И. Метод, расчёты и технология интенсивного деформирования гнутых профилей типовой номенклатуры. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2004. 246 с.
4. Филимонов В.И., Филимонов С.В. Условия замыкания калибров при интенсивном формообразовании открытых профилей в роликах // Производство проката. 2004. № 11. С. 23–28.
5. Патент РФ на полезную модель № 50886. МПК B21D 5/06. Профилегибочный стан / В.А. Литвинов, А.В. Филимонов, Д.П. Зарубин, С.В. Филимонов, В.И. Лапшин. Опубл. 27.01.2006. Бюл. № 03.



РЕЗЬБОНАКАТЫВАНИЕ. (Библиотека технолога)

А.В. Киричек, А.Н. Афонин

2009. – 312 с. ISBN: 978-5-94275-428-0

Цена 550 р.

В книге описаны существующие резьбы и способы их изготовления, приведены конструкция и основные характеристики резьбонакатного оборудования и технологической оснастки для накатывания резьб, конструкция и методики проектирования резьбонакатного инструмента, технология накатывания резьб, требования к заготовкам под накатывание и режимам обработки.

Книга предназначена для инженерно-технических работников и специалистов промышленных предприятий, может быть полезна студентам, аспирантам и научным работникам.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Строгинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.983.7:621.744.3

Е.М. Баранова, канд. техн. наук, доц., **А.Н. Баранов**, канд. техн. наук, доц.
(Тульский государственный университет)
stroymaster@tula.net

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ВЫТЯЖКИ-ОБЖИМА ОБОЛОЧЕК

Рассмотрены теоретические основы прогрессивного проектирования технологической операции вытяжки-обжима тонкостенных замкнутых сложнопрофильных оболочек, изложены методы учёта деформационного упрочнения материала, представлены результаты экспериментального определения коэффициентов начальной и деформационной анизотропии.

Ключевые слова: вытяжка, обжим, оболочка, деформация, формоизменение, оживальная часть, упрочнение, анизотропия, латунь, биметалл.

Progressive designing theoretical principles of the draw-forming-wrapping out technological operation for thin-walled enclosed complex shape shells are considered. Accounting methods of the material deformative hardening are stated. Experimental definition results of the initial and deformative anisotropy coefficients are introduced.

Key words: draw-forming, wringing out, shell, deformation, forming, ogival part, hardening, anisotropy, brass, bimetal.

Анализ применяемых в настоящее время методик расчёта операции обжима тонкостенных замкнутых сложнопрофильных оболочек выявил, что существующие методики обладают рядом недостатков, основными из которых являются следующие:

не представляется возможным выполнить обоснованный расчёт оптимального количества операций технологии обжима с выявлением предельно допустимых степеней деформации;

при обжиме в качестве основного принят критерий разрушения, а не критерий предельной устойчивости, что противоречит технологическим условиям производства;

имеющиеся методики не учитывают существенное влияние на процессы обжима оболочек начальной и деформационной анизотропии материала, что в некоторых случаях расчёта критических деформаций приводит к значительным (до 50 %) погрешностям [1].

Операцию «обжим оболочек» правильнее называть вытяжкой-обжимом, поскольку в ходе её происходит одновременное уменьшение диаметральных размеров и увеличение длины полуфабрикатов за счёт применения сложнопрофильного инструмента. Далее в работе операция «обжим» называется вытяжкой-обжимом.

Анизотропия механических свойств существенно влияет на силовые режимы, распределение деформаций и напряжений в заготовке, технологические параметры процессов обработки металлов давлением (ОМД). Учёт анизотропии механических свойств в процессе проектирования операций ОМД позволяет спрогнозировать ожидаемые механические свойства материала в резуль-

тате формоизменения, оценить напряжённое и деформированное состояние, установить оптимальные режимы технологического процесса и предельные коэффициенты деформации [2].

Важной проблемой теории ОМД является обеспечение устойчивости процесса деформирования. Предельную, критическую величину формообразования удобнее определять исходя из момента возникновения сосредоточенного утонения, так как этим достигается определённая гарантия стабильности процесса и упрощение расчётов на устойчивость этапа формообразования.

В процессе вытяжки-обжима оболочек потеря устойчивости материала проявляется в виде образования кольцевой канавки в опасном сечении полуфабрикатов – в месте соединения оживальной (покатой) и головной частей оболочек.

В статье изложено решение научно-технической задачи проектирования операции вытяжки-обжима оболочек с учётом анизотропии материала и с обеспечением устойчивости заготовки в процессе её деформации.

На рис. 1 представлены заготовка и готовая оболочка с конечными размерами. Для операции вытяжки-обжима исходной заготовкой является полуфабрикат последней вытяжки.

Устойчивость равновесия оболочки характеризуется способностью материала сохранять определённую форму при действии заданной нагрузки. Момент потери устойчивости заготовки может наступить в начальной стадии процесса, когда пуансон только вступает в контакт с заготовкой. Трение между поверхностями заготовки и пуансона в этот момент отсутствует. По мере внедрения инструмента в металл заготовка полностью облегает

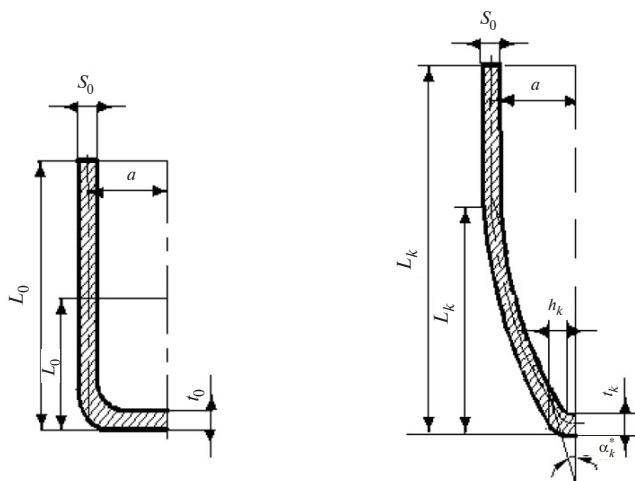


Рис 1. Заготовка (а) и готовая оболочка (б):

S_0 – толщина стенки цилиндрической части; a – срединный радиус цилиндрической части; L_0 – длина заготовки; l_0 – длина части заготовки, подвергающейся формоизменению; t_0 – толщина дна заготовки; L_k – длина готовой оболочки; l_k – длина оживальной части готовой оболочки; t_k – толщина дна готовой оболочки; h_k – толщина стенки в опасном сечении готовой оболочки; α_k^* – угол между стягивающей хордой и осью симметрии готовой оболочки

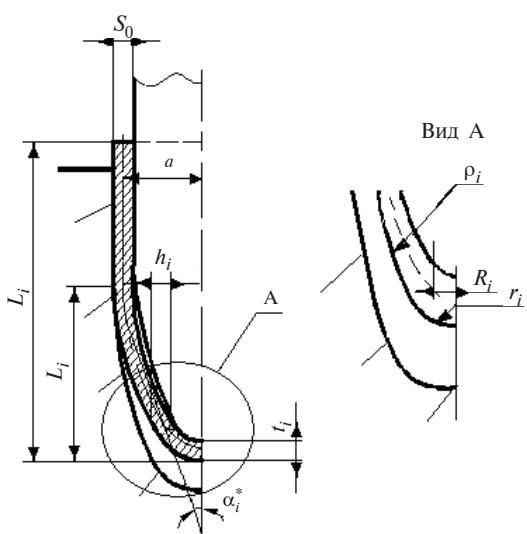


Рис. 2. Полуфабрикат оболочки, подвергающийся в текущей стадии вытяжке-обжиму:

L_i – длина полуфабриката; l_i – длина оживальной части полуфабриката; t_i – толщина дна полуфабриката; h_i – толщина стенки в опасном сечении полуфабриката; α_i^* – угол между стягивающей хордой и осью симметрии полуфабриката; ρ_i – срединный радиус скругления оживальной части полуфабриката; r_i – срединный радиус скругления головной части полуфабриката; R_i – радиус в опасном сечении полуфабриката

пуансон, потери устойчивости в этот момент произойти не может, поскольку между поверхностями заготовки и инструмента возникает контактное трение.

На рис. 2 представлен полуфабрикат оболочки, подвергающийся в текущей стадии вытяжке-обжиму.

На рис. 3 представлен элемент заготовки, выделенный в очаге пластической деформации и подверженный действию напряжений вследствие нагружения; угол $d\phi = \frac{dl}{\rho_i}$ (с учётом наименьших порядков малости).

Запишем относительно осей x и z (радиальное и меридиональное направления формоизменения) уравнения равновесия, приводя подобные члены и отбрасывая члены высшего порядка малости:

$$\frac{d(\sigma_1 Rh)}{dR} - \sigma_2 h = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d(\tau_1 Rh)}{dR} - 2\sigma_2 h \operatorname{ctg}\alpha^* = 0, \quad (2)$$

где σ_1, σ_2 – главные напряжения в меридиональном и радиальном направлениях соответственно; τ_{13} – касательное напряжение, действующее с площадки напряжения σ_1 в направлении главного напряжения в осевом направлении σ_3 .

Условие текучести Мизеса для анизотропного материала с учётом допущения равенства параметров анизотропии ($F = G$) и плосконапряжённого состояния представим в виде уравнения

$$(H + F)(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) - 2H\sigma_1\sigma_2 + 2H\tau_{13}^2 = 1, \quad (3)$$

где F, G, H – параметры анизотропии материала по трём направлениям.

Приведём ассоциированный закон пластического течения, связывающий приращения деформаций и компоненты напряжений:

$$dE_1 = \frac{dl}{l} = d\lambda[(F = H)\sigma_1 - H\sigma_2];$$

$$dE_2 = \frac{dR}{R} = d\lambda[(F = H)\sigma_2 - H\sigma_1]; \quad (4)$$

$$dE_3 = \frac{dh}{h} = -d\lambda(\sigma_1 - H\sigma_2); \quad (5)$$

$$d\gamma_{13} = d\lambda H\tau_{13},$$

где dE_1, dE_2, dE_3 – приращения деформаций в меридиональном, радиальном и осевом направлениях соответственно; $d\gamma_{13}$ – приращение деформации сдвига; $d\lambda$ – коэффициент пропорциональности; $dl = \rho_i d\phi$.

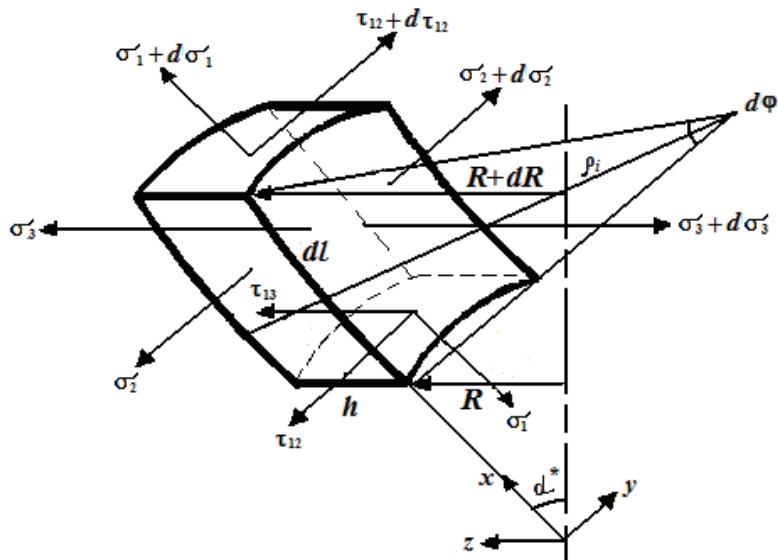


Рис. 3. Напряжённое состояние элемента оболочки в текущей стадии вытяжки-обжима

В представленные выражения входят неизвестные σ_1 , σ_2 , τ_{13} , h , $d\lambda$. Исключив $d\lambda$ и применив принцип Сен-Венана, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dh}{h} = \frac{F(\sigma_1 + \sigma_2)}{H\sigma_1 - (F+H)\sigma_2} \frac{dR}{R}; \\ \frac{d(\sigma_1 Rh)}{dR} - \sigma_2 h = 0; \\ (F+H)(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) - 2H\sigma_1\sigma_2 = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Система уравнений (6) позволяет получить точное решение с выводом параметрических выражений для σ_1 и σ_2 , удовлетворяющих условию текучести:

$$\sigma_1 = 2K_0 \cos(\omega - \omega_0);$$

$$\sigma_2 = 2K_0 \cos(\omega - \omega_0),$$

где $2K_0 = \sigma_{1S} \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}}$; $\omega_0 = \arctg \frac{1}{\sqrt{1+2r}}$; σ_{1S} – предел текучести материала в меридиональном направлении; $r = \frac{H}{F}$ – коэффициент анизотропии исходного материала; ω – параметр, характеризующий положение точки, определяющей значение напряжений на эллипсе текучести.

Решение системы (6) относительно $\frac{dR}{R}$ позволяет получить выражение, из которого определяется логарифмическая степень деформации:

$$\ln \frac{a}{R} = \frac{\omega_0 + \psi}{2 \operatorname{tg} \omega_0} + \frac{1}{4} \left[\frac{\operatorname{tg}(\omega_0 + \psi)}{1 + \operatorname{tg}^2(\omega_0 + \psi)} + (\omega_0 + \psi) \right] \times$$

$$\times \frac{\operatorname{tg}^2 \omega_0 - 1}{\operatorname{tg} \omega_0} - \frac{1}{2[1 + \operatorname{tg} 2(\omega_0 + \psi)]} - \frac{\omega}{2 \operatorname{tg} \omega_0} -$$

$$- \frac{1}{4} \frac{\operatorname{tg} \omega}{1 + \operatorname{tg}^2 \omega} \frac{\operatorname{tg}^2 \omega_0 - 1}{\operatorname{tg} \omega_0} - \frac{1}{2(1 + \operatorname{tg}^2 \omega)},$$

где $\psi = \arccos \left(\frac{\Delta \sigma_1}{2K_0} \right)$; $\Delta \sigma_1$ – дополнительное напряжение на внешнем контуре заготовки от участка свободного изгиба, определяемое соотношением $\Delta \sigma_1 = \frac{\sigma_{1S} h_0 \sin \alpha^*}{2\sqrt{\alpha h_0}}$.

Вытяжка-обжим с определённым отношением a/R за один переход возможна, если максимальное меридиональное растягивающее напряжение $\sigma_{1\max}$, действующее в опасном сечении оболочки, не превосходит напряжения начала образования шейки $\sigma_{\text{ш}}$, выбранного в качестве критерия пластической устойчивости материала. Тогда за условие устойчивости процесса вытяжки-обжима может быть принято неравенство, на основании которого определяется предельная степень деформации:

$$\sigma_{1\max} \leq \sigma_{1\max}^*$$

Максимальное растягивающее меридиональное напряжение $\sigma_{1\max}$, действующее в опасном сечении оболочки, является функцией логарифмической степени деформации, коэффициента трения, коэффициента анизотропии материала, а также геометрии инструмента:

$$\sigma_{1\max} = \left[2K_0 \cos(\omega - \omega_0) + \frac{\sigma_{1S} h_0}{2R + h_0 \sin \alpha^*} \right] \times (1 + \mu \alpha^*) \quad (7)$$

Материал полуфабрикатов оболочек от перехода к переходу операции вытяжки-обжима имеет способность к упрочнению. С целью выявления функциональной зависимости напряжения текучести от степени деформации в процессе вытяжки-обжима экспериментально исследовано изменение твёрдости вдоль образующей оживальной части оболочек пуль к спортивно-охотничьему патрону калибра 7,62 мм из биметалла № 3 (ГОСТ 807–78) и латуни Л 90 (ГОСТ 15527–70). Полученные значения твёрдости дают возможность определить изменение временного сопротивления разрыву с учётом упрочнения, используя выражение

$$\sigma_B = CHV,$$

где C – коэффициент; HV – твёрдость по шкале Виккерса.

Зная значение временного сопротивления разрыву, можно определить предел текучести:

$$\frac{\sigma_{1S}}{\sigma_B} = K,$$

где K – коэффициент пропорциональности.

По результатам проведённого исследования построены графики зависимости предела текучести от степени деформации

сти от степени деформации полуфабрикатов первого и второго переходов операции вытяжки-обжима (рис. 4).

Анализ данных исследования позволил получить зависимость предела текучести от степени деформации материала оболочек в процессе операции вытяжки-обжима:

$$\sigma_{1S} = n \sigma_{1S}^{incx} (1 + K \epsilon_{обж}), \quad (8)$$

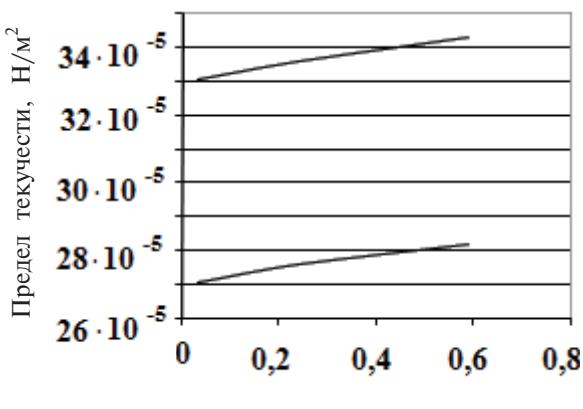
где n – коэффициент, учитывающий упрочнение материала, произошедшее при первом обжиме; σ_{1S}^{incx} – исходный предел текучести материала; K_1 – коэффициент, зависящий от вида материала.

Используя зависимость (8) выражение (7) примет вид:

$$\sigma_{1\max} = \left[2K_0 \cos(\omega - \omega_0) + \frac{n \sigma_{1S}^{incx} (1 + K_1 \epsilon_{обж}) h_0}{2R + h_0 \sin \alpha^*} \right] \times (1 + \mu \alpha^*) \quad (9)$$

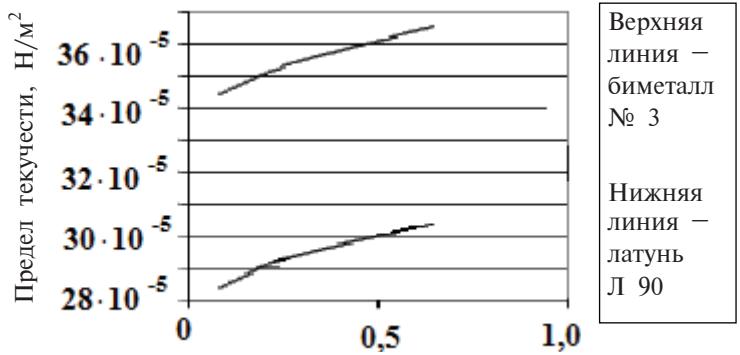
Сравнив уравнения (7) и (9), можно уточнить расчётные значения предельных степеней деформации вытяжки-обжима оболочек при проектировании соответствующих операций.

Для получения точных расчётных значений напряжений проведён эксперимент по определению коэффициентов анизотропии образцов, вырезанных из оболочек пуль к спортивно-охотничьему патрону калибра 7,62 мм (биметалл № 3 (ГОСТ 807–78), латунь Л 90 (ГОСТ 15527–70)). При расчёте операции вытяжки-обжима оболо-



Логарифмическая степень деформации

a)



Логарифмическая степень деформации

б)

Рис. 4. Зависимости предела текучести от степени деформации полуфабрикатов вытяжки-обжима:
а – первый переход; б – второй переход

чек по настоящей методике для первого перехода вытяжки-обжима исходным коэффициентом анизотропии является коэффициент анизотропии материала в состоянии поставки, так как упрочнённое дно в процессе вытяжки не затрагивалось. Для второго и третьего переходов, соответственно, исходными коэффициентами анизотропии являются коэффициенты анизотропии материала полуфабрикатов первого и второго переходов операции вытяжки-обжима.

Коэффициент анизотропии определялся путём растяжения прямоугольных образцов. Подготовка и проведение эксперимента проводились с использованием метода планирования эксперимента в соответствии с ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» и ГОСТ 11701–84 «Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент».

На этапе подготовки эксперимента из полуфабрикатов вырезались прямоугольные образцы под углами 0 и 90° к оси оболочки с целью определения коэффициентов анизотропии в меридиональном и окружном направлениях [2, 3].

Коэффициент анизотропии r_a определяли при максимальном (конечном) равномерном удлинении по формуле

$$r_a = \frac{\lg \frac{b_0}{b_2}}{\lg \frac{b_0 l_{e2}}{b_0 l_e}},$$

где b_0 — ширина образца до испытания; b_2 — ширина образца после испытания; l_e — начальная расчётная

длина образца по тензометру, равная начальной расчётной длине образца; l_{e2} — расчётная длина образца по тензометру при относительном конечном равномерном удлинении.

На рис. 5 представлены графики зависимости коэффициентов анизотропии исследуемых материалов от степени деформации (r_0 , r_{90} — коэффициент анизотропии в меридиональном и окружном направлении соответственно; r_{cp} — средний коэффициент анизотропии) [4, 5].

По результатам опытов на растяжение плоских прямоугольных образцов построены кривые упрочнения для биметалла № 3 и латуни Л 90, необходимые для графоаналитического определения напряжения начала образования шейки, входящего в состав условия пластической устойчивости.

На рис. 6 представлены кривые упрочнения для исследуемых материалов.

По экспериментальным данным получены зависимости выходных параметров эксперимента, таких как равномерное конечное удлинение l_2 и ширина образца после испытаний b_2 от степени деформации материала, т. е. номера перехода вытяжки-обжима C и направления вырезки образцов H :

биметалл № 3 —

$$l_2 = 1,703 + 0,752C - 0,0028H + 0,0023CH;$$

$$b_2 = 3,253 + 1,607C - 0,0005H + 0,0023CH;$$

латунь Л 90 —

$$l_2 = 1,91 + 0,192C - 0,00367H + 0,0093CH;$$

$$b_2 = 3,2 + 1,25C - 0,00055H + 0,00584CH.$$

Разработанная методика проектирования операции вытяжки-обжима апробирована на обо-

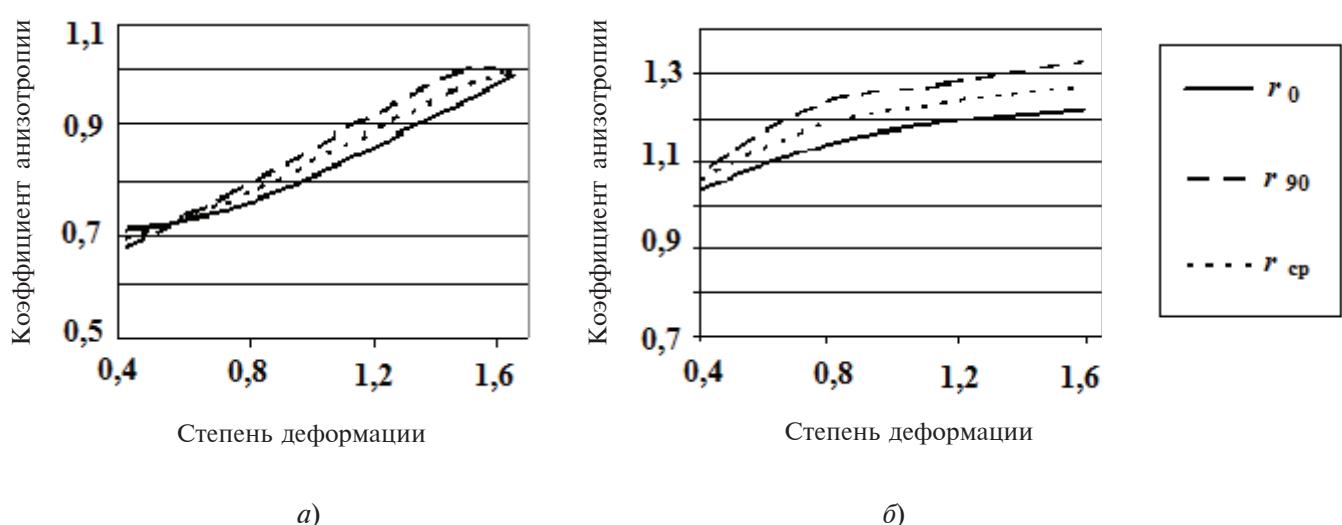


Рис. 5. Зависимость коэффициентов анизотропии от степени деформации:
а — биметалл № 3; б — латунь Л 90

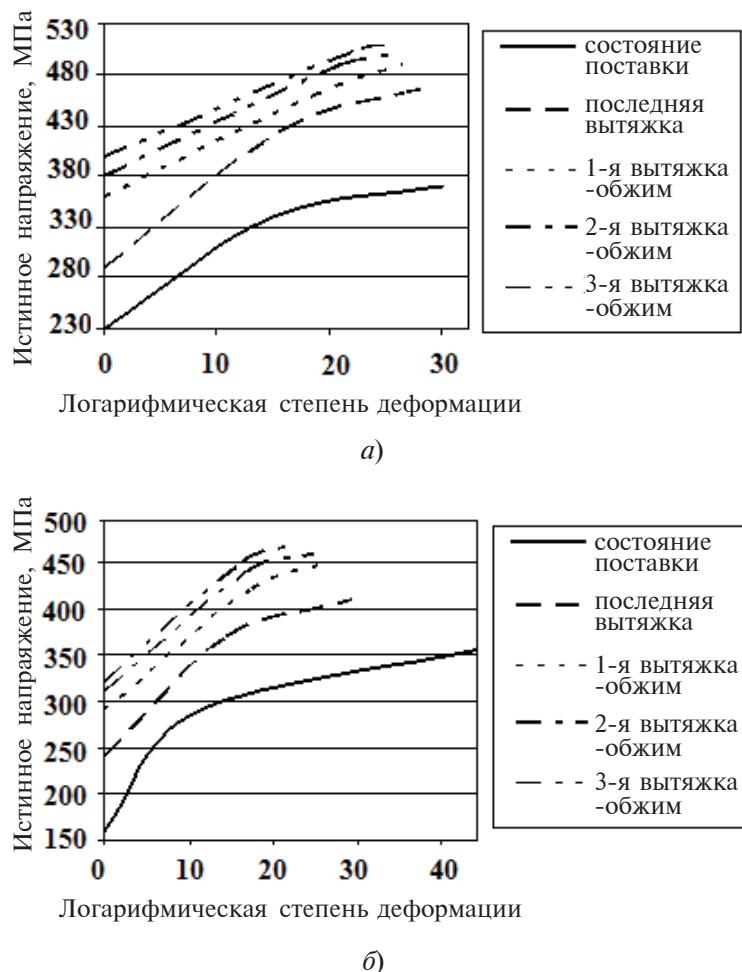


Рис. 6. Кривые упрочнения:
а – для биметалла № 3; б – для латуни Л 90

лочках к спортивно-охотничьему патрону калибра 7,62 мм (количество переходов сократилась с трёх до двух). Современная методика позволяет выявить предельно-допустимые степени деформации, что приводит к сокращению числа переходов операции и повышению эффективности технологического процесса производства тонкостенных замкнутых сложнопрофильных оболочек.

Библиографические ссылки

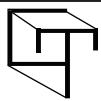
1. **Баранова Е.М.** Вырубка заготовок из анизотропных материалов. Изв. вузов. Серия: машиностроение, системы приводов и деталей машин. Сб. материалов Международной электронной науч.-техн. конф. «Творческое наследие Прейса В.Ф.», Тула: ТулГУ, 2006. С. 291–297.

2. **Баранова Е.М.** Изменение коэффициента анизотропии и механических свойств в процессе вытяжки-обжима тонкостенных оболочек. Сб. материалов науч.-техн. конф. Саров, 2005. С. 23–29.

3. **Баранова Е.М.** Программное обеспечение для расчёта операции вытяжки-обжима оболочек. Известия вузов. Серия: машиностроение, системы приводов и деталей машин. Сб. материалов Международной электронной науч.-техн. конф. «Творческое наследие Прейса В. Ф.», Тула: ТулГУ, 2006. С. 309–314.

4. **Лялин В.М.** Автоматизированное проектирование технологии обжима тонкостенных анизотропных цилиндрических изделий//Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Сб. науч. тр. Тула: ТулГУ, 1995. С. 123–129.

5. **Хилл Р.** Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1948. 407 с.



УДК 510.52

В.А. Головешкин, д-р техн. наук, проф., **А.В. Пономарёв**, канд. физ.-мат. наук
(Московский государственный университет приборостроения и информатики)

М.В. Ульянов, д-р техн. наук, проф.
(Государственный университет – Высшая школа экономики, г. Москва)
muljanov@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ КЛАССА РЕКУРРЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЙ С АДДИТИВНОЙ ФУНКЦИЕЙ СТЕПЕННОГО ВИДА В ЦЕЛЯХ АНАЛИЗА ТРУДОЁМКОСТИ РЕКУРСИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

Предложено аналитическое решение специального класса нелинейных рекуррентных соотношений со степенной аддитивной функцией. Исследуемые рекуррентные соотношения характерны для функций трудоёмкости рекурсивных алгоритмов, разработанных методом декомпозиции и обладающих степенной трудоёмкостью объединения полученных решений. Анализические решения получены для рекуррентных соотношений с аргументами типа «пол» и «потолок», возникающих при теоретическом рассмотрении исследуемого класса. Результаты позволяют аналитически получить функции трудоёмкости рекурсивных алгоритмов, декомпозиционирующих решаемую задачу со степенной трудоёмкостью объединения результатов

Ключевые слова: рекурсивные алгоритмы, трудоёмкость, рекуррентные соотношения, аналитическое решение.

Analytical decision of the nonlinear recurrent correlation special class with exponential additive function is proposed. Researched recurrent correlation are typical for recursive algorithms laborious function, which have been developed by decomposition method and possess exponential laborious of the received decisions consolidation. Analytical decisions for recurrent correlation with arguments type “floor” and “ceiling” arising for researched class theoretical consideration are derived. Results make it possible to analytically receive of the recursive algorithms laborious functions which decompose of the determined task with exponential laborious of the decisions consolidation.

Key words: recursive algorithms, laborious, recurrent correlation, analytical decision.

Введение. При исследовании рекурсивных алгоритмов очевидный интерес представляет задача получения функции трудоёмкости алгоритма в явном виде (аналитическое решение) на основе теоретического анализа. Содержательно трудоёмкость понимается как число заданных алгоритмом базовых операций принятой модели вычислений, при этом аргументом функции трудоёмкости является длина входа алгоритма [1]. Практический интерес к этой задаче обусловлен необходимостью исследования класса рекурсивных алгоритмов, разработанных методом декомпозиции. Цель настоящей статьи — предложить аналитическое решение данной задачи в классе рекурсивных декомпозиционирующих алгоритмов со степенной аддитивной функцией.

Основная идея метода декомпозиции состоит в сведении исходной задачи к решению ряда более простых задач с понижением их размерности [1, 2]

и последующим объединением полученных решений. Такой подход порождает, очевидно, рекурсивную структуру алгоритма и соответственно описание функции трудоёмкости в виде рекуррентного соотношения [1]. При этом под размерностью задачи понимается некоторая мера длины входа алгоритма.

Формально: пусть n — размерность решаемой задачи, тогда если в рекурсивном алгоритме при решении задачи размерности n происходит такое её разделение, которое приводит к необходимости решения C подзадач размерностью n/k , и k является делителем n , т. е. $n \bmod_k = 0$, то функция трудоёмкости такого алгоритма $f_A(n)$ имеет вид [1]:

$$f_A(n) = C \cdot f_A(n/k) + d(n) + U(n), \quad (1)$$

где $d(n)$ — трудоёмкость фрагмента алгоритма, выполняющего разделение (декомпозицию) задачи на

подзадачи; $U(n)$ — трудоёмкость фрагмента алгоритма, объединяющего полученные решения C подзадач размерностью n/k в решение задачи размерности n .

При этом на шаге останова рекурсии для некоторой малой размерности задачи, т. е. при $0 \leq n \leq n_0$, возможно её прямое (не рекурсивное) решение. Обозначив трудоёмкость получения этого прямого решения через $N_0(n)$, и вводя обозначение $g(n) = d(n) + U(n)$, с учётом выражения (1) получаем вид рекуррентного соотношения для функции трудоёмкости алгоритмов, разработанных методом декомпозиции в частном случае, если значение k является делителем числа n [1]:

$$\begin{cases} f_A(n) = N_0(n), & 0 \leq n \leq n_0; \\ f_A(n) = C \cdot f_A(n/k) + g(n), & n > n_0. \end{cases} \quad (2)$$

В общем случае размерность решаемой задачи должна, очевидно, быть целой, следовательно, если $n \bmod k \neq 0$, то вместо значения n/k в качестве аргумента функции должна фигурировать целая часть частного с округлением вниз или вверх, т. е. $\lfloor n/k \rfloor$ или $\lceil n/k \rceil$, что существенно осложняет получение аналитического решения. Таким образом, приходим к рекуррентным соотношениям вида

$$\begin{cases} f_A(n) = N_0(n), & 0 \leq n \leq n_0; \\ f_A(n) = C \cdot f_A(\lfloor n/k \rfloor) + g(n), & n > n_0, \end{cases} \quad (3)$$

где через $\lfloor \cdot \rfloor$ мы обозначаем $\lfloor \cdot \rfloor$ или $\lceil \cdot \rceil$. Функция $g(n)$ в соотношении (3) называется аддитивной функцией рекуррентного соотношения.

Изучение различных подклассов рекуррентных соотношений вида (3) привело к получению целого ряда результатов как аналитических решений для некоторых частных случаев, например для $k=2$ и функции $g(n)$ линейного вида [3], так и асимптотических оценок функции $f_A(n)$ при $n \rightarrow \infty$. Основная теорема о рекуррентных соотношениях [4] позволяет получить асимптотическое поведение функции $f_A(n)$ при $n \rightarrow \infty$ для достаточно широкого класса функций $g(n)$ при произвольных целых C и k . Очевидно, что для функций $g(n)$ определённого вида могут быть получены не только асимптотические оценки, но и аналитические решения. Автор данной статьи получил некоторые частные аналитические решения для рассматриваемых рекуррентных соотношений: для аргумента типа $\lfloor n/k \rfloor$ и функций $g(n)$ линейного вида [5], для аргумента вида $\lceil n/k \rceil$ и линейной функции $g(n)$ [6]. Настоящая статья содержит результаты исследований авторов в части более широкого специального класса рекуррентных соотношений (3) с аргументами вида $\lfloor n/k \rfloor$ или $\lceil n/k \rceil$, обобщающие ранее полученные результаты на функции $g(n)$ степенного вида.

Постановка задачи. Рассмотрим специальный класс рекуррентных соотношений вида (3) со степенной функцией $g(n)$, соответствующий функциям трудоёмкости алгоритмов, разработанных методом декомпозиции задачи размерности n на C подзадач размерностью $\lfloor n/k \rfloor$ или $\lceil n/k \rceil$, где C, k — целые положительные числа: $C \geq 2, k \geq 2$. В дальнейшем функцию трудоёмкости алгоритма будем обозначать через f . Поскольку множество полиномов замкнуто относительно сложения, то, не теряя общности, предполагаем, что функция $g(n)$ имеет степенной вид $g(n) = An^p$. Тогда задача состоит в получении аналитического решения для класса рекуррентных соотношений вида

$$\begin{cases} f(0) = d, n = 0; \\ f(n) = C \cdot f(\lfloor n/k \rfloor) + A \cdot n^p, n > 0. \end{cases} \quad (4)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ понимается как в (3), а аргумент функции n содержательно представляет собой длину входа исследуемого алгоритма.

Отметим, что соотношения типа (4) характерны для функций трудоёмкости алгоритмов решения задачи сортировки, поиска выпуклого охватывающего контура, умножения матриц по Штрассену, умножению длинных целых по Карацубе [1, 2]. Например, рекуррентное соотношение, описывающее трудоёмкость алгоритма умножения матриц по Штрассену, с точностью до главного порядка аддитивной функции, имеет следующий вид [2]:

$$f(n) = 7 \cdot f(\lfloor n/2 \rfloor) + A \cdot n^2.$$

Рассмотрим последовательно два подкласса в соотношении (4) — подкласс I с аргументом вида «пол» — $\lfloor n/k \rfloor$ и подкласс II с аргументом вида «потолок» — $\lceil n/k \rceil$.

Аналитическое решение рекуррентных соотношений в подклассе I. Поскольку для этого подкласса в правой части соотношения (4) аргументом функции является целая часть с округлением вниз от деления аргумента n на значение k — $\lfloor n/k \rfloor$, рассмотрим специальное представление числа n по степеням k :

$$\begin{aligned} n &= b_m k^m + b_{m-1} k^{m-1} + \cdots + b_1 k + b_0 = \sum_{i=0}^m b_i k^i, \\ m &= \lfloor \log_k n \rfloor, m \geq 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где $b_m : 0 < b_m < k$, $b_i : 0 \leq b_i < k, i = \overline{1, m-1}$ — целые числа (цифры в системе счисления по основанию k).

Рассмотрим также числа N_i , определяемые как $N_i = \left\lfloor \frac{n}{k^i} \right\rfloor$.

Согласно выражению (5) и в соответствии с определением чисел N_i получаем следующие формулы:

$$\begin{aligned} N_0 &= n = \sum_{i=0}^m b_i k^i, & N_i &= \sum_{j=i}^m b_j k^{j-i}, \\ N_m &= b_m, & N_{m+1} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим значения функции $f(\cdot)$ из соотношения (4) для рассматриваемого подкласса I с аргументом N_i . В силу определения N_i деление на k и взятие целой части приводят к следующим выражениям:

$$\begin{aligned} f(N_0) &= Cf(N_1) + AN_0^p, \\ f(N_1) &= Cf(N_2) + AN_1^p, \\ &\dots \\ f(N_i) &= Cf(N_{i+1}) + AN_i^p, \\ &\dots \\ f(N_m) &= Cf(N_{m+1}) + AN_m^p. \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку число n представляется в виде выражения (5), и $f(N_0) = n$, $f(N_{m+1}) = f(0) = d$, то последовательно подставляя значения $f(N_i)$, $i = m+1, 1$ в $f(N_{i-1})$, тем самым, решая рекуррентное соотношение методом подстановки, получаем аналитическое решение для $f(n)$:

$$\begin{aligned} f(n) &= C^{m+1}f(0) + A \sum_{i=0}^m C^i N_i^p = \\ &= C^{m+1}d + A \sum_{i=0}^m C^i N_i^p, \end{aligned} \quad (8)$$

Главная асимптотика (4) при $n \rightarrow \infty$ оценивается соотношением

$$\begin{aligned} f(n) &\sim C^{m+1}d + A \sum_{i=0}^m C^i \frac{n^p}{k^{(ip)}} = \\ &= C^{m+1}d + An^p \frac{1 - \frac{C^{m+1}}{k^{(m+1)p}}}{1 - \frac{C}{k^p}} = \\ &= C^{m+1}d + A \frac{n^p}{k^{mp}} \frac{k^{(m+1)p} - C^{m+1}}{k^p - C}. \end{aligned} \quad (9)$$

Рассмотрим полученную главную асимптотику функции $f(n)$ для разных случаев, порождаемых знаком знаменателя в соотношении (9):

1. При $C < k^p$ асимптотика функции $f(n)$ имеет вид

$$f(n) \sim An^p \frac{1}{1 - \frac{C}{k^p}} = An^p \frac{k^p}{k^p - C}.$$

2. При $C = k^p$ асимптотика функции $f(n)$ имеет вид

$$f(n) \sim C^{m+1}d + An^p(m+1),$$

но так как значение $m = \lfloor \log_k n \rfloor$, то

$$\begin{aligned} f(n) &\sim C^{1+\lfloor \log_k n \rfloor}d + An^p(\lfloor \log_k n \rfloor + 1) = \\ &= k^p dk^{\lfloor \log_k n \rfloor} + An^p(\lfloor \log_k n \rfloor + 1). \end{aligned}$$

3. При $C > k^p$ асимптотика функции $f(n)$ имеет вид

$$f(n) \sim C^{1+\lfloor \log_k n \rfloor}d + An^p \left(\frac{\left(\frac{C}{k^p} \right)^{\lfloor \log_k n \rfloor + 1}}{\frac{C}{k^p} - 1} \right).$$

Заметим, что в частном случае при $p = 2$ в соответствии с выражениями (6) и (8), функция $f(n)$ представляется в виде

$$f(n) = C^{m+1}d + A \sum_{i=0}^m C^i \cdot \left(\sum_{j=i}^m b_j k^{j-i} \right)^2, \quad (10)$$

т. е. является квадратичной формой относительно b_j и может быть преобразована следующим образом:

$$f(n) = C^{m+1}d + \sum_{i=0}^m b_i \cdot \left(\sum_{j=0}^i S_{ij} \cdot b_j \right), \quad (11)$$

где S_{ij} — коэффициенты квадратичной формы.

Получим эти коэффициенты в явном виде путём дифференцирования выражений (10) и (11) по аргументу b_l , $l = \overline{0, m}$. Дифференцирование выражения (11) позволяет установить связь между коэффициентами квадратичной формы и производными функции $f = f(n)$:

$$\frac{\partial f}{\partial b_l} = \sum_{j=0}^l S_j b_j + \sum_{i=l}^m S_i b_i, \quad b_l = \overline{0, m},$$

что позволяет выразить коэффициенты S_{ij} через вторые производные:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial b_l \partial b_r} = S_{lr}, r < l; \quad \frac{\partial^2 f}{\partial b_l^2} = 2S_{ll}. \quad (12)$$

Дифференцирование выражения (10) позволяет получить явные выражения для первых производных:

$$\frac{\partial f}{\partial b_l} = A \sum_{i=0}^l C^i \cdot \left(\sum_{j=i}^m b_j k^{j-i} \right) \cdot (2 \cdot k^{l-i}), \quad (13)$$

откуда в соответствии с формулой (12), вторые частные производные (13) позволяют определить явные выражения для коэффициентов квадратичной формы:

а) при $r < l$ коэффициенты S_{rl} :

$$S_{lr} = \frac{\partial^2 f}{\partial b_l \partial b_r} = A \sum_{i=0}^r 2C^i k^{r-i} \cdot k^{l-i} = 2Ak^{r+l} \sum_{i=0}^r \frac{C^i}{k^{2i}} = \\ = 2Ak^{l-r} \frac{k^{2(r+1)} - C^{r+1}}{k^2 - C}, \quad (14)$$

б) при $r = l$ — коэффициенты S_{ll} :

$$S_{ll} = \frac{\partial^2 f}{\partial b_l^2} = 2A \frac{k^{2(l+1)} - C^{l+1}}{k^2 - C}. \quad (15)$$

Аналитическое решение рекуррентных соотношений в подклассе II. Для этого подкласса в правой части соотношения (4) аргументом функции является «потолок» — $\lceil n/k \rceil$. В целях получения аналитического решения представим число n в следующем виде:

$$n = b_m k^m - b_{m-1} k^{m-1} - L - b_1 k - b_0, \\ m = \lceil \log_k n \rceil, m \geq 1, \quad (16)$$

где $b_m : 0 < b_m < k$, $b_i : 0 \leq b_i < k$, $i = \overline{1, m-1}$ — целые числа.

По аналогии с подклассом I рассмотрим числа M_i , определяемые как $M_i = \left\lceil \frac{n}{k^i} \right\rceil$. Согласно выражению (16) и определению чисел M_i , получаем для них следующие формулы:

$$M_0 = n, M_i = b^m k^{m-i} - \sum_{j=i}^{m-1} b_j k^{j-i}, \\ M_m = b_m, M_{m+1} = 0. \quad (17)$$

Представление (17) позволяет получить соотношения, аналогичные выражению (7), а именно значения функции $f(\cdot)$ с аргументом типа «потолок» из (4), в случае если её аргументами являются числа M_i , задаются формулами

$$f(M_0) = Cf(M_1) + AM_0^p, \\ f(M_1) = Cf(M_2) + AM_1^p, \\ \dots \\ f(M_i) = Cf(M_{i+1}) + AM_i^p, \\ \dots \\ f(M_m) = Cf(M_{m+1}) + AM_m^p. \quad (18)$$

Поскольку число n представляется в виде (16) и $f(M_0) = n$, $f(M_{m+1}) = f(0) = d$, то, последовательно подставляя значения $f(M_i)$, $i = \overline{m+1, 1}$ в $f(M_{i-1})$, тем самым решая рекуррентное соотношение (4) методом подстановки, получаем аналитическое решение для $f(n)$:

$$f(n) = C^{m+1} f(0) + A \sum_{i=0}^m C^i M_i^p = \\ = C^{m+1} d + A \sum_{i=0}^m C^i M_i^p. \quad (19)$$

Главная асимптотика (19) при $n \rightarrow \infty$ аналогична соотношениям, полученным для подкласса I, однако, основное отличие состоит в том, что для подкласса II значение $m = \lceil \log_k n \rceil$, в то время как значение m для подкласса I имеет вид $m = \lfloor \log_k n \rfloor$. Таким образом, в случае, если $C = k^p$ имеем

$$f(n) \sim k^p d k^{\lceil \log_k n \rceil} + An^p (\lceil \log_k n \rceil + 1).$$

Для частного случая ($p = 2$), аналогично ситуации в подклассе I преобразуем $f(n)$, подставляя в решение (19) формулу (17) для чисел M_i :

$$f(n) = C^{m+1} d + A \sum_{i=0}^m C^i \left(b^m k^{m-i} - \sum_{j=i}^m b_j k^{j-i} \right)^2, \quad (20)$$

и аналогично представим $f(n)$ в виде квадратичной формы относительно b_j :

$$f(n) = C^{m+1} d + \sum_{i=0}^m b_i \left(\sum_{j=0}^i b_j S_{ij} \right), \quad (21)$$

где S_{ij} — коэффициенты квадратичной формы, которые связаны с частными производными функции f известными соотношениями (12).

Дифференцирование формулы (20) позволяет получить явные выражения для частных производных:

$$\frac{\partial f}{\partial b_l} = A \sum_{i=0}^l C^i \left(b^m k^{m-i} - \sum_{j=i}^{m-1} b_j k^{j-i} \right) (-2k^{l-i}). \quad (22)$$

Особенностью формулы (22) по сравнению с аналогичным результатом для подкласса I, который задаётся формулой (13), является изменение знака у сомножителя k^{l-i} , связанное с видом функции $f(n)$ (20). Это приводит к тому, что при $l < m$ и $r < l$ вторые частные производные (22) позволяют определить коэффициенты S_{lr} , которые совпадают с выражениями, полученными для коэффициентов квадратичной формы в подклассе I:

$$S_{lr} = \frac{\partial^2 f}{\partial b_l \partial b_r} = 2Ak^{l-r} \frac{k^{2(r+1)} - C^{r+1}}{k^2 - C},$$

однако при $l = m$ и $r < m$ — коэффициенты S_{mr} изменяют знак:

$$S_{lr} = \frac{\partial^2 f}{\partial b_m \partial b_r} = -2Ak^{m-r} \frac{k^{2(r+1)} - C^{r+1}}{k^2 - C},$$

в то время как при $l = r$, в том числе и при $l = m$, коэффициенты S_{ll} совпадают с формулой (15), и задаются выражением

$$S_{ll} = \frac{\partial^2 f}{\partial b_l^2} = 2A \frac{k^{2(l+1)} - C^{l+1}}{k^2 - C}.$$

Заключение. Получены аналитические решения для нелинейных рекуррентных соотношений

с аргументами типа «пол» и «потолок», относящихся к специальному классу с аддитивной функцией степенного вида. Для частного случая квадратичной функции получено представление аналитического решения в виде квадратичной формы и определены её коэффициенты. Рекуррентные соотношения рассмотренного класса возникают при теоретическом анализе трудоёмкости рекурсивных алгоритмов, разработанных методом декомпозиции. Полученные результаты могут быть использованы в целях детального теоретического анализа рекурсивных декомпозирующих алгоритмов, имеющих степенную трудоёмкость разделения задачи и объединения полученных решений.

Библиографические ссылки

1. Головешкин В.А., Ульянов М.В. Теория рекурсии для программистов. М.: Физматлит. 2006. 296 с.
2. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2005. 1296 с.
3. Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О. Конкретная математика. Основание информатики / Пер. с англ. М.: Мир, 1998. 703 с.
4. Bentley J.L., Haken D., Saxe J. A general method for solving divide-and-conquer recurrences // SIGACT News. 1980. 12(3). P. 36–44.
5. Головешкин В.А., Ульянов М.В. Аналитическое решение специального класса рекуррентных соотношений в целях анализа рекурсивных алгоритмов // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. 2008. № 3(62). С. 96–107.
6. Головешкин В.А., Михайлов Б.М., Пономарев А.В., Ульянов М.В. Аналитическое решение подкласса рекуррентных соотношений в целях анализа трудоёмкости рекурсивных алгоритмов // Вестник МГУПИ. Сер. «Технические и естественные науки». 2009. № 15. С. 34–41.

Уважаемые авторы и читатели журнала!

В соответствии с решениями президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России журнал «Автоматизация и современные технологии» включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук.

УДК 515.171.23: 519.854

В.В. Шипилов, канд. техн. наук, доц. (ФГУ «13 ГНИИ Минобороны России», г. Люберцы)

fgushipilov@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВА ОПТИМАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ЛИНЕЙНОЙ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

Предложен новый подход к преобразованию многомерных данных за счёт применения множества оптимально расположенных элементов. Сформулировано определение множества оптимально расположенных элементов и доказана теорема о его существовании и единственности. Приведены примеры построения множества и преобразования многомерных данных для задач линейной и многокритериальной оптимизации аппаратной части автоматизированных средств контроля радиоэлектронного оборудования.

Ключевые слова: множество оптимально расположенных элементов, преобразование многомерных данных, линейная и многокритериальная оптимизация вариантов средств контроля.

New transformation approach of the many-dimensional, data through the use of a optimally located components multitude is proposed. Definition of the optimally located components multitude is formulated and its existence and uniqueness theorem is proved. Examples are adduced for multitude construction and many-dimensional, data transformation for the linear and multi-objective optimization tasks for apparatus part of the automatic control means for radio-electronic equipment.

Key words: optimally located components multitude, many-dimensional, data transformation, linear and multi-objective optimization of the control means versions.

Введение. Совершенствование радиоэлектронного оборудования (РЭО) и разрабатываемых для него автоматизированных средств контроля (АСК) РЭО влечёт за собой неизбежный рост количества исследуемых и оцениваемых их технических и экономических характеристик (ТЭХ). Они описываются численными значениями, которым в соответствие поставлены определённые конкретные единицы измерения. В качестве таких характеристик могут рассматриваться, например, частота приёма и передачи радиостанции – в герцах, мощность излучения в частотном диапазоне передатчика – в ваттах, чувствительность приёмника – в вольтах, стоимость – в рублях и т. д.

Очевидно то, что чем большее количество характеристик РЭО принимается во внимание при создании АСК, тем труднее обосновать их структуру и состав аппаратной части и осуществлять поиск приемлемого варианта АСК. Это связано с тем, что при математическом описании сложных технических объектов и систем возникает ряд научных проблем, которые обусловлены:

сложностью нормирования данных, представленных различными вещественными значениями и единицами измерений (проблема «обезразмеривания» многомерных данных);

ростом трудоёмкости вычислительных операций при увеличении количества данных («проклятие» размерности);

обеспечением содержательной сопоставимости значений различных целевых функций при многомерной и многокритериальной оптимизации или их «свертки» в один комплексный критерий (проблема формирования «сводной» целевой функции).

В настоящее время указанные выше проблемы имеют свои частные решения [1–12]. Например, понижение размерности данных можно провести за счёт использования метода главных компонент или независимых компонент с наименьшей потерей информации [1–4] или за счёт применения генетических алгоритмов [6–8]. Для нормирования многомерных данных используют методы многомерного шкалирования [9], а при решении задач многокритериальной оптимизации применяют метод «арбитражных решений» и т. п. [10–12].

Однако все они имеют свои недостатки, которые проявляются в виде:

частичной потери информации при принижении размерности задачи;

обоснования функции стресса, определяющей соответствие структур многомерных данных до и после преобразования;

сохранения порядка значений чисел при нормировании многомерных данных, т. е. очень маленькие значения чисел остаются очень «маленькими», а максимальные по значению числа будут равны единице;

выбора и обоснования обобщённых значений коэффициентов показателей в сводной целевой функции для задач многокритериальной и много-параметрической оптимизации.

Следует отметить, что при этом возникает ещё одна проблема, обусловленная недостатком вычислительной мощности персональной электронно-вычислительной машины при использовании арифметических операций – сложения, умножения, деления и вычитания.

Для преодоления указанных проблем предлагается новый подход, который базируется на использовании понятия множества оптимально расположенных элементов, доказательства его существования и единственности. Основой идеи этого подхода является замена вещественных значений элементов исходного множества на целочисленные значения с сохранением существующего отношения порядка элементов в исходном множестве на преобразованном множестве так, чтобы разность между двумя соседними элементами по модулю в преобразованном множестве была минимальна. В результате такого преобразования выполняется переход от заданной единицы измерения элементов исходного множества (значений чисел) к одной условной единице.

Множество оптимально расположенных элементов. Определение: Упорядоченное множество элементов $m_i \in M$, где $i = 1, 2, \dots, I$ – количество элементов множества M , характеризуемое порядком следования элементов $\{m_1\alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{i-1,i}m_i, \dots, \alpha_{I-1,I}m_I\}$, отношением порядка $\alpha_{i-1,i} \in A$ на M , где $\alpha_{i-1,i} (" \leq " \vee " < ")$ – отношение порядка, определяемое для пары элементов $(m_{i-1}, m_i) \in M$, последовательностью расстояний $\{d_{1,2}, \dots, d_{i-1,i}, \dots, d_{I-1,I}\}$, $d_{i-1,i} \in D$, вычисляемых для $(m_{i-1}, m_i) \in M$, где $d_{i-1,i} = |m_i - m_{i-1}|$, будем называть упорядоченным множеством оптимально расположенных элементов $M_{A,D}$, если для всех пар элементов $(m_{i-1}, m_i) \in M$ по порядку их следования $\alpha_{i-1,i} \in A$ выполняется условие $d_{i-1,i} \rightarrow \gamma$, $\gamma \rightarrow \min$ и $\gamma = 0, 1, \dots, N$, где N – монотонно возрастающая последовательность целых чисел, включая нейтральный элемент «ноль».

Теорема: Для изоморфных множеств S^k существует только одно упорядоченное множество оптимально расположенных элементов $M_{A,D}$, где $k=0, 1, \dots, K$, K – количество множеств S^k .

Доказательство: Пусть существует некоторое множество S^k с порядком следования элементов $\{s_1^k \alpha_{1,2}^k, \dots, \alpha_{i-1,i}^k s_i^k, \dots, \alpha_{I-1,I}^k s_I^k\}$, $\alpha_{i-1,i}^k (" \leq " \vee " < ")$, $\alpha_{i-1,i}^k \in A^k$ и заданными произвольным образом расстояниями $d_{i-1,i}^k = |s_i^k - s_{i-1}^k|$ между элементами $(s_{i-1}^k, s_i^k) \in S^k$ не противоречащих общему отношению порядка A^k . Проведём процедуру разбиения множества S^k на подмножества S_i^k – классы эквивалентности по модулю численного значения $|s_i^k|$

элементов $s_i^k \in S^k$, $i = 0, 1, \dots, I$, I – количество классов эквивалентности по модулю числа. Для этого воспользуемся свойствами математической индукции.

Предварительно выполним две вспомогательные операции.

Во-первых, сформируем для всех элементов $s_i^k \in S^k$ множество \tilde{S}^k так, чтобы $\tilde{s}_i^k = sg(s_i^k)$, $\tilde{s}_i^k \in \tilde{S}^k$,

$$\text{где } sg(s_i^k) = \begin{cases} 1, & s_i^k > 0, \\ 0, & s_i^k = 0, \\ -1, & s_i^k < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Во-вторых, проверим множество S^k на условие нахождения в нём нейтральных элементов. Если они определены, то выделим их во вспомогательное множество S_0^k . При этом исключим элементы $s_i^k \in S_0^k$ из исходного множества S^k , если нет, то полагаем $S_0^k = \emptyset$.

На первом шаге $i = 1$ и множество $(S^k / S_0^k) \neq \emptyset$. Определяем все элементы, численное значение которых по модулю минимально, и сформируем подмножество S_1^k , исключая элементы $s_i^k \in S_1^k$ из множества S^k .

На следующем шаге $i > 1$ и множество $S^k \neq \emptyset$. Повторяем процедуру нахождения наименьших элементов, равных по модулю, на множестве оставшихся элементов $s_i^k \in (S^k / \bigcup_{i=1}^I S_{i-1}^k) \neq \emptyset$ и сформируем подмножество S_i^k . Разбиение продолжается до тех пор, пока множество $S^k \neq \emptyset$.

В результате получим монотонно возрастающую по индексу i последовательность $\{S_0^k, S_1^k, \dots, S_i^k, \dots\}$ классов эквивалентности, каждый из которых состоит из $|s_i^k| \in S_i^k$ одинаковых по модулю значений элементов. Замена численных значений $|s_i^k| \in S_i^k$ на значение индекса i позволяет обеспечить условие $d_{i-1,i} \rightarrow \gamma$, $\gamma \rightarrow \min$ для упорядоченных пар преобразованных элементов $(|s_{i-1}^k|, |s_i^k|) \in S_i^k$, где $|s_{i-1}^k| = i-1$, $|s_i^k| = i$. Восстановление исходного отношения порядка $\alpha_{i-1,i}^k \in A^k$ для элементов $|s_i^k| \in S_i^k$ производится операцией $m_i^k = \tilde{s}_i^k \cdot |s_i^k|$ в соответствии с выражением (1), а преобразованные элементы m_i^k будут являться элементами множества оптимально расположенных элементов $M_{A,D}$. Таким образом, доказано существование упорядоченного множества оптимально расположенных элементов $M_{A,D}$.

Для доказательства единственности множества $M_{A,D}$ выдвинем следующую гипотезу. Пусть существует несколько изоморфных по отношению порядка $\alpha_{i-1,i}^k \in A^k$ и количеству элементов $s_i^k \in S^k$

множеств $S^k \in S$, отличающихся только расстоянием $d_{i-1,i}^k = |s_i^k - s_{i-1}^k|$ между упорядоченными парами элементов $(s_{i-1}^k, s_i^k) \in S^k$. Если множество S^1 изоморфно множеству S^k , а множество S^k в результате преобразования изоморфно $M_{A,D}$, то множество S^1 изоморфно множеству $M_{A,D}$. Значит существует многократное доказательство существования одного множества $M_{A,D}$ и, следовательно, доказана его единственность.

Следует обратить внимание на то, что в случае если множества S^k имеют разное количество элементов, т. е. различные мощность и упорядоченность A^k , $k = 0, 1, \dots, K$, то из элементов этих множеств всегда можно сформировать общее множество S со своим новым отношением порядка A . Формирование множества оптимально расположенных элементов $M_{A,D}$ происходит аналогичным образом, согласно представленному доказательству теоремы. Затем из элементов $M_{A,D}$ восстанавливаются подмножества $\tilde{M}_{A,D}^k$, изоморфные множествам S^k .

Отметим, что параметр $u_i \in U$, выступающий в качестве минимального шага между классами эквивалентности, может задаваться как метрическим, так и неметрическим способом, например монотонно возрастающей последовательностью вещественных чисел $\{0, 0,01, 0,02, \dots, +\infty\} \in R^+$ или алфавитом $\{a, b, c, \dots, z\} \in L$.

Физический смысл построения множества $M_{A,D}$ заключается в нахождении отображения $f: S^k \rightarrow M_{A,D}$, позволяющего оптимально уменьшить расстояния между всеми элементами множества S^k , которые находятся в определённом «отношении» относительно друг друга.

Такое отображение может быть применено к любым физическим, математическим, гипотетическим объектам и совокупностям их характеристик с различными единицами измерений, которые описываются количественно в виде натуральных, целых, вещественных и комплексных чисел, а также бинарных кодов и других аналогичных им математических абстракций.

Пример построения множества оптимально расположенных элементов. Пусть $\{u_1, \dots, u_i, \dots, u_I\}$ – последовательность измерений переменного напряжения в вольтах на заданной контрольной точке для некоторого объекта контроля РЭО, где $u_i \in U$, $i = 0, 1, \dots, I$ и $I = 8$. Порядок следования измерений $i \in I$ и численные значения постоянного напряжения $u_i \in U$ представлены в табл. 1.

Требуется сформировать упорядоченное множество оптимально расположенных элементов $m_i \in M$ и перейти к условным единицам измерений.

Во-первых, запомним знаки элементов последовательности $u_i \in U$ во множестве \tilde{U} , $\tilde{u}_i \in \tilde{U}$, используя выражение (1) (табл. 2).

Таблица 1

Последовательность измерений переменного напряжения U

| Переменные | | Численные значения индексов и элементов множества | | | | | | | | | |
|------------|-------|---|---|-------|-------|---|------|---|------|------|------|
| i | u_i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | -3,45 | 0 | -4,25 | -3,45 | 0 | 3,55 | 0 | 5,32 | 4,25 | 5,32 |

Таблица 2

Сохранение знаков последовательности элементов множества U в множестве \tilde{U}

| Переменные | | Численные значения индексов и элементов множества | | | | | | | | | |
|------------|---------------|---|---|----|----|---|---|---|---|---|----|
| i | \tilde{u}_i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Таблица 3

Упорядочение элементов последовательности U по модулю

| Переменные | | Численные значения индексов и модуля элементов множества | | | | | | | | | |
|------------|---------|--|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| i | $ u_i $ | 2 | 5 | 7 | 1 | 4 | 6 | 3 | 9 | 8 | 10 |
| | | 0 | 0 | 0 | 3,45 | 3,45 | 3,55 | 4,25 | 4,25 | 5,32 | 5,32 |

Во-вторых, вычислим значение модуля числа $|u_i|$ для каждого элемента последовательности $u_i \in U$ и упорядочим её в порядке возрастания $|u_i|$ (табл. 3).

В-третьих, сгруппируем равные по модулю элементы последовательности U и сформируем четыре класса Cl_j , $j = 0, 1, \dots, J$, $J = 4$, эквивалентных по модулю элементов. Затем проведём замену численных значений $|u_i| \in Cl_j$ на номера их классов Cl_j и представим их в виде элементов $|m_i| = j$. Такая замена позволяет найти значение модуля для элементов $|m_i|$ множества оптимально расположенных элементов $m_i \in M$ (табл. 4).

В-четвертых, возвратим на множество $m_i \in M$ порядок следования элементов и их знак в соответствии с порядком следования и знаками элементов множества $u_i \in U$, используя вспомога-

тельное множество $\tilde{u}_i \in \tilde{U}$, где $m_i = \tilde{u}_i |m_i|$. Упорядочим элементы $u_i \in U$ и $m_i \in M$ по порядку следования индекса i , получим изоморфное множество U множество M (табл. 5).

Располагая элементы множества M в порядке возрастания численных значений элементов $m_i \in M$, получим упорядоченное множество оптимально расположенных элементов.

Таким образом, происходит процесс «обезразмеривания» физического значения элементов множества $u_i \in U$ без нарушения порядка их следования и одновременного оптимального сжатия расстояний между всевозможными парами элементов множества U .

Применение множества оптимально расположенных элементов в задачах многокритериальной оптимизации вариантов автоматизированных средств контроля. Пусть заданы пять вариантов аппарат-

Таблица 4

Классы эквивалентности равных по модулю элементов Cl_j

| Переменные | Численные значения индексов и элементов множеств, классы эквивалентных по модулю элементов | | | | | | | | | |
|------------|--|---|---|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| | Cl_0 | | | Cl_1 | | Cl_2 | | Cl_3 | | Cl_4 |
| Cl_j | | | | | | | | | | |
| j | 0 | | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 |
| $ m_i $ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| i | 2 | 5 | 7 | 1 | 4 | 6 | 3 | 9 | 8 | 10 |
| $ u_i $ | 0 | 0 | 0 | 3,45 | 3,45 | 3,55 | 4,25 | 4,25 | 5,32 | 5,32 |

Таблица 5

Множество оптимально расположенных элементов M

| Переменные | Численные значения индексов и элементов множеств | | | | | | | | | |
|------------|--|---|-------|-------|---|------|---|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| u_i | -3,45 | 0 | -4,25 | -3,45 | 0 | 3,55 | 0 | 5,32 | 4,25 | 5,32 |
| m_i | -1 | 0 | -3 | -1 | 0 | 2 | 0 | 4 | 3 | 4 |

Таблица 6

Исходные данные и характеристики вариантов аппаратной части АСК

| Номер варианта АСК, x_i | Объём a_i^v , м ³ | Масса a_i^m , кг | Потребляемая мощность от сети a_i^p , Вт | Срок службы a_i^t , лет | Стоимость a_i^s , руб. |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------|--|---------------------------|--------------------------|
| x_1 | 0,0030 | 140 | 2000 | 5 | 26 500 |
| x_2 | 0,0045 | 150 | 1500 | 5 | 21 500 |
| x_3 | 0,0015 | 200 | 1500 | 6 | 19 950 |
| x_4 | 0,0025 | 100 | 3000 | 6 | 38 400 |
| x_5 | 0,0015 | 350 | 1000 | 7 | 41 400 |

ной части АСК $x_i \in X$, каждый из которых описывается последовательностью ТЭХ

$$\{a_i^v, a_i^m, a_i^p, a_i^t, a_i^s\} \in x_i,$$

где a_i^v – занимаемый объём АСК, измеряемый в кубических метрах; a_i^m – масса в килограммах; a_i^p – потребляемая мощность АСК от сети в ваттах; a_i^t – срок службы, определяемый количеством лет; a_i^s – стоимость АСК в рублях, $i = 1, 2, \dots, I$, $I = 5$.

Значения ТЭХ вариантов АСК представлены в табл. 6.

Требуется сформировать набор АСК, который удовлетворял бы следующим условиям: общие габаритные размеры или занимаемый суммарный объём набора АСК не должен превышать $0,075 \text{ м}^3$; масса набора АСК – не менее 350 кг; потребляемая мощность от энергосети – не более 3500 Вт.

При формировании набора АСК необходимо учесть, что его стоимость должна быть минимальна, а входящие в его состав варианты аппаратной части АСК должны обладать наибольшим сроком службы. Определение такого набора АСК является задачей многокритериальной оптимизации и описывается следующими системами уравнений:

$$\begin{cases} 26500x_1 + 21500x_2 + 19950x_3 + \\ + 8400x_4 + 41400x_5 \rightarrow \min; \\ 5x_1 + 5x_2 + 6x_3 + 6x_4 + 7x_5 \rightarrow \max, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} 140x_1 + 150x_2 + 200x_3 + 100x_4 + 350x_5 \geq 350; \\ 0,003x_1 + 0,0045x_2 + 0,0015x_3 + 0,0025x_4 + \\ + 0,0015x_5 \leq 0,075; \\ 2000x_1 + 1500x_2 + 1500x_3 + 3000x_4 + 1000x_5 \leq \\ \leq 3500, \end{cases} \quad (3)$$

где любой ($x_i, i \in I$) вариант АСК принимает значение, равное единице, если АСК входит в набор АСК, и ноль – в противном случае.

Система уравнений (2) задаёт критериальную область оптимизации характеристик создаваемого набора АСК, а система уравнений (3) определяет область допустимых решений.

Используем предложенный выше подход и преобразуем вещественные значения ТЭХ АСК на целочисленные значения, перейдя от пяти единиц измерения к одной, условной единице измерения. С учётом такой замены значений характеристик АСК эквивалентные системы уравнений (2) и (3) будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 + 1x_3 + 4x_4 + 5x_5 \rightarrow \min; \\ 1x_1 + 1x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 3x_5 \rightarrow \max, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 1x_4 + 5x_5 \geq 5; \\ 3x_1 + 4x_2 + 1x_3 + 2x_4 + 1x_5 \leq 5; \\ 3x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 4x_4 + 1x_5 \leq 5. \end{cases} \quad (5)$$

Упростим системы (4) и (5). Для этого выполним в уравнении (4) операцию вычитания из первого уравнения второго, для того чтобы найти решение, удовлетворяющее одновременно двум критериям. В этом случае задача многокритериальной оптимизации системы (4) и (5) может быть сведена к задаче линейного булевого программирования вида:

$$2x_1 + 1x_2 - 1x_3 + 2x_4 + 2x_5 \rightarrow 0, \quad (6)$$

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 1x_4 + 5x_5 \geq 5; \\ 3x_1 + 4x_2 + 1x_3 + 2x_4 + 1x_5 \leq 5; \\ 3x_1 + 2x_2 + 2x_3 + 4x_4 + 1x_5 \leq 5. \end{cases} \quad (7)$$

Решением для задач (6) и (7) являются второй ($x_2 = 1$) и третий ($x_3 = 1$) варианты АСК, которые входят в искомый состав набора средств контроля. Остальные варианты АСК $x_1 = 0$, $x_4 = 0$ и $x_5 = 0$ не удовлетворяют условию равенства (6) нулю.

Применение множества оптимально расположенных элементов в задачах линейной оптимизации. Необходимо пояснить, каким образом восстанавливать исходные значения неизвестных, если решение задачи получено с помощью предложенного выше подхода в преобразованном виде. Рассмотрим в общем виде задачу линейного программирования, описываемую следующей системой уравнений:

$$y(x) = 5x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 3x_4 \rightarrow \max, \quad (8)$$

$$\begin{cases} 1500x_1 - 1000x_2 + 2000x_3 + 1400x_4 \leq 3000; \\ -0,0001x_1 + 0,0003x_2 + 0,0002x_3 + \\ + 0,0002x_4 \leq 0,0005; \\ 3x_1 + 4x_2 + 3x_3 + 4x_4 \leq 7. \end{cases} \quad (9)$$

Найдём решение, используя любой математический пакет типа «MathCad», «Mathematica» или «Maple». Целевая функция (8) достигает максимального значения $y(x) = 11,056$, если план задачи (8) – (9) содержит точки $x_1 = 2,111$, $x_2 = 0,167$, $x_3 = 0$ и $x_4 = 0$.

Проведём замену вещественных значений в исходной задаче линейного программирования на целочисленные значения согласно разработанному подходу. С учётом проведённой замены задача

линейного программирования, эквивалентная задачам (8) и (9), примет вид

$$\tilde{y}(x) = 3x_1 + 1x_2 + 2x_3 + 1x_4 \rightarrow \max, \quad (10)$$

$$\begin{cases} 3x_1 - 1x_2 + 4x_3 + 2x_4 \leq 5; \\ -1x_1 + 3x_2 + 2x_3 + 2x_4 \leq 4; \\ 1x_1 + 2x_2 + 1x_3 + 2x_4 \leq 4. \end{cases} \quad (11)$$

Решением задачи (10) – (11) являются точки $x_1 = 2$, $x_2 = 2$, $x_3 = 2$ и $x_4 = 2$ при значении целевой функции $\tilde{y}(x) = 7$. Для того чтобы восстановить истинные значения переменных x_1 и x_2 для исходной задачи линейного программирования (8) – (9), необходимо понизить её размерность за счёт исключения нулевых переменных $x_3 = 0$ и $x_4 = 0$. Таким образом, задача линейного программирования (8) – (9) будет сведена к системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} 1500x_1 - 1000x_2 = 3000; \\ -0,0001x_1 + 0,0003x_2 = 0,0005; \\ 3x_1 + 4x_2 = 7. \end{cases} \quad (12)$$

Выразим переменную x_1 из третьего уравнения и подставим её в первое уравнение, затем найдём решение для системы (12): $x_1 = 2,111$, $x_2 = 0,167$. Отметим, что полученное решение является решением задачи линейного программирования (8) – (9).

Заключение. Применение множества оптимально расположенных элементов в задачах линейной и многокритериальной оптимизации аппаратных частей АСК РЭО позволяет:

осуществить переход от различных единиц измерения ТЭХ АСК РЭО к одной условной единице измерения;

привести различные порядки численных значений ТЭХ объектов РЭО и разрабатываемых для них АСК РЭО к целочисленным значениям;

выполнить процедуру «обезразмеривания» исходных данных без использования функции стресса, используемой в методах многомерного шкалирования;

понизить размерность задач линейной и многокритериальной оптимизации без потери информации;

обосновать сводную целевую функцию в задачах многокритериальной и многопараметрической оптимизации.

Применение множества оптимально расположенных элементов для преобразования коэффициентов – численных значений ТЭХ АСК РЭО в задачах линейной и многокритериальной оптимизации аппаратных частей АСК РЭО выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК–3735.2004.10.

Библиографические ссылки

1. Дубов А.М. Обработка статистических данных методом главных компонент. М.: Статистика, 1973. 560 с.
2. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
3. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. СПб.: Питер, 2001. 752 с.
4. Орлов А.И. Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004. 354 с.
5. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операций. Целочисленное программирование / Пер. с англ. В.Т. Вавилова и др. М.: Мир, 1977. Т.3. 432 с.
6. Букатова И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения. М.: Наука, 1979. 228 с.
7. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: Учеб.-метод. пос. / Под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: ИД «Астраханский университет», 2007. 87 с.
8. Загоруйко Н.Г., Ёлкина В.Н., Лбов Г.С. Алгоритмы обнаружения эмпирических закономерностей. Новосибирск: Наука, 1985. 110 с.
9. Толстова Ю.Н. Основы многомерного шкалирования. М.: КД «Университет», 2006. 160 с.
10. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Статистика, 1977. 128 с.
11. Хэдми А. Таха. Введение в исследование операций. 6-е изд. / Пер. с англ. В.И. Тюпти, А.А. Минько / Под ред. Е.Д. Давидян. М.: ИД «Вильямс», 2001. 912 с.
12. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Пер. с англ. В.В. Подиновского, М.Г. Гафта и др. / Под ред. И.Ф. Шахнова. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.

УДК 004.451.1

И.И. Лавреш, канд. техн. наук (Сыктывкарский лесной институт – филиал ГОУ ВПО «Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С.М. Кирова»)

lavr@rktomi.ru

САМООРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ И МЕРЫ СОГЛАСОВАНИЯ ИНТЕРЕСОВ СУБЬЕКТА И ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Отмечены особенности понятия «самоорганизация» применительно к элементам искусственных систем. Сформулированы основные свойства самоорганизации как фактора, способного снизить эффективность управления искусственными системами. Приведены макромодели организационных систем. Описаны меры рассогласования (согласования) интересов субъекта и объекта управления или подведомственного объекта.

Ключевые слова: макромодели организационных систем, ранжировка показателей, мера согласования интересов.

Conception features «self-organization» with regard to artificial systems components are noted. Self-organization basic characteristics as factor capable to lower of the artificial systems control efficiency are formulated. Organizational systems macro models are adduced. Mismatch (agreement) measures of the control subject and object requirements or the dependant object requirements are described.

Key words: organizational systems macro models, indexes regulating, requirements agreement.

Введение. Самоорганизация – термин, используемый в синергетике, который в теории систем до 80-х гг. XX в. не применялся, а использовался термин «самоуправление» [1]. Первые макромодели организационных систем заимствованы из кибернетики. В них субъект управления умеет лучше и имеет право планировать действия объекта управления, а объект управления умеет лишь хорошо, добросовестно исполнять решения субъекта управления. Теория исследования операций (60-е гг. XX в.), в рамках которой совершенствовался системный подход, развивалась в основном в этом направлении.

Однако попытки применения теории исследования операций и системного подхода в народном хозяйстве (вне оборонной тематики) встретились с большими трудностями. Одной из неожиданностей для приверженцев системного подхода к исследованиям было нарушение гипотезы о равной заинтересованности в результатах функционирования и равной степени их получения у субъекта и объекта управления. В общем случае элементы объекта управления имеют собственные интересы, не всегда полностью совпадающие с интересами субъекта управления. Прежде всего, несовпадение касается способов получения результатов, а не самих результатов функционирования. В ряде случаев объект может отказаться выполнять предписанные или ожидаемые субъектом управления действия. Он может действовать иначе,

затягивая сроки получения ожидаемых результатов или сроки, получая несколько другие результаты.

Основная часть. Кибернетическая макромодель организационной системы имеет вид, представленный на рис.1.

Система делится на две части: субъект и объект управления [2], а состояние системы описывается универсумом A . Состояние внешней среды определяется универсумом W . В результате функционирования системы получают результаты S , которые являются истинным подмножеством универсума $A : S \subset A$. Результаты $s, s \in S$ служат входным сигналом для субъекта управления (подсистемы данной системы). Результаты S – это результаты деятельности объекта управления, являющиеся реакцией объекта управления на два входных

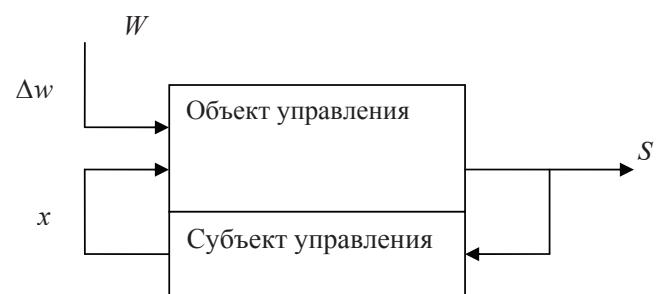


Рис. 1. Кибернетическая макромодель организационной системы

сигнала: воздействия внешней среды Δw и управлеченческих воздействий x , вырабатываемых объектом управления как реакция на отклонение текущих результатов s от некоторых плановых значений $S^{\text{пл}}$.

Термин самоорганизация в синергетике строго не определяется, как это требует логика (через род и вид), а вводится метафорически. В последние годы предпринимаются попытки описания деятельности систем, в которых наряду с управлением фигурирует самоорганизация.

Самоорганизация – это вид действий элементов искусственных систем, выражаящийся в стихийном упорядочении действий, направленных на обеспечение собственных интересов, согласуемых в определённых пределах с интересами субъекта управления, зависящих от обстановки и образа действий субъекта управления.

Необходимо отметить следующие особенности этого понятия. Во-первых, оно применимо лишь к элементам искусственных систем. К явлениям и процессам природы его применение неоправданно: для их описания в науке применяется понятие «законы природы». Во-вторых, подчёркивается, что упорядочение действий элементов происходит стихийно, т. е. нет некоего организационно оформленного центра, который осуществляет подразумеваемое упорядочение действий. В-третьих, степень подчинения собственных интересов элементов интересам субъекта управления зависит от обстановки и образа действий субъекта управления. Не исключаются ситуации, когда интересы элементов системы полностью подчиняются интересам субъекта управления. Образ действия субъекта управления – это обобщённая характеристика соблюдения норм морали и права в отношениях начальника и подчинённых. В-четвёртых, самоорганизация может быть свойственна и некоторым элементам субъекта управления. В этом случае речь идет об отношениях, непосредственно выходящих за рамки чисто служебных отношений, но способных косвенно влиять на качество выполняемых функций элементов субъекта управления. В-пятых, самоорганизация при определённых условиях может трансформироваться в организацию действий, приобретая все атрибуты процесса управления: наличие некоторого центра, может быть виртуального, координирующего, направляющего действия элементов, добровольно подчиняющихся этому центру; наличие планов и механизмов их реализации. В этом случае в рамках системы появляется ещё система, которая не обязательно полностью подчиняет свою деятельность управлению субъекта управления. При определённых условиях взаимодействие систем может перерости в конфликт.

Приведём основные свойства самоорганизации как фактора, способного влиять на эффективность управления искусственными системами:

самоорганизация, как феномен социальной организации индивидуумов и их групп, может иметь несколько фаз, образующих жизненный цикл самоорганизации объекта управления или подведомственного объекта: зарождение, становление, развитие, акме, переход в организованное противостояние субъекту управления или спад противостояния, партнёрство или другие формы согласования интересов объекта и субъекта управления;

указанные выше фазы жизненного цикла самоорганизации являются нечёткими множествами по длительности и характеристикам проявления (сущи претензий к субъекту управления, численности групп индивидуумов с одним видом претензий и т. д.);

начальные фазы зарождения, становления, самоорганизации носят латентный характер и без негативных последствий могут самоликвидироваться или перейти в фазу партнёрства при соответствующих действиях субъекта управления. В фазе развития самоорганизация целенаправленно диагностируется и ликвидируется без негативных для субъекта управления последствий при его соответствующей политике взаимодействий с объектом управления (подведомственным объектом) или переходит в фазу партнёрства, если политика будет направлена на удовлетворение выявленных потребностей объекта управления (подведомственного объекта). Достижение фазы акме достаточно легко идентифицируется не только социологическими опросами, но и обычным мониторингом уровней решения текущих задач системы (систематическое падение или стагнация объективно измеренных показателей при одних и тех же управлеченческих воздействиях и похожих внешних условиях деятельности системы – первый признак явного противостояния объекта и субъекта управления);

самоорганизация при увеличении противостояния объекта и субъекта управления проходит последовательно фазы зарождения, становления, развития, акме, организованного противостояния, если субъект управления не согласовывает свои интересы и интересы элементов подведомственного объекта или объекта управления, а при соответствующей политике может наблюдаться спад противостояния до любой предшествующей фазы;

партнёрство как форма взаимодействия объекта и субъекта управления – событие маловероят-

ное в отсутствии социальной политики субъекта управления;

в трёх начальных фазах возможности «активного» изменения траектории системы на малых отрезках времени намного выше у субъекта управления; в фазе акме стихийное противостояние большинства элементов объекта управления можно ликвидировать репрессивными мерами, оговоренными в системах, создаваемых наймом исполнителей, или предусматриваемых нормативными актами в системах, создаваемых принуждением.

Таковы основные свойства самоорганизации объектов управления и подведомственных объектов искусственных систем. Однако свойства требуют существенных поправок к существующим теориям систем. Одна из таких поправок сводится к замене ранее принятой макромодели организационных систем на модель [3], представленную на рис. 2.

На рис. 2 показан ещё один контур самоорганизации подведомственного объекта, а наличие двойной линии (сплошной и пунктирной) символизирует размытость границ системы с внешней средой, между объектом и субъектом управления (подведомственным объектом).

Другими задачами теории являются:

- формирование методов диагностики и прогнозирования влияния самоорганизации на результаты функционирования систем;
- обоснование меры рассогласования (согласования) интересов субъекта и объекта управления или подведомственного объекта.

Решение задачи «б» является необходимым условием решения задачи «а». Остановимся на её решении.

Сформулируем аксиомы, на основе которых можно найти соответствующую меру рассогласования/согласования.

Аксиома 1. Сопоставляемые интересы индивидуумов и/или их групп отражаются в ранжировках значимости (ценности) совокупности показателей, с ориентацией на значения которых они строят свои действия.

Здесь и далее ранжировка показателей K_i , $i = 1, m$, $m \geq 2$ означает, что показатели расположены по убыванию (возрастанию) их важности. Ранжировка называется убывающей, если показатели располагаются по убыванию. В дальнейшем используются именно такие ранжировки. По умолчанию используется термин ранжировка.

В теории полезности ранжировку m показателей K_i , $i = 1, m$, задают несколькими способами. Один из них – строгое предпочтение: $K_i > K_k$ означает, что показатель с номером i более предпочтителен, чем k -й показатель, $i \neq k$;

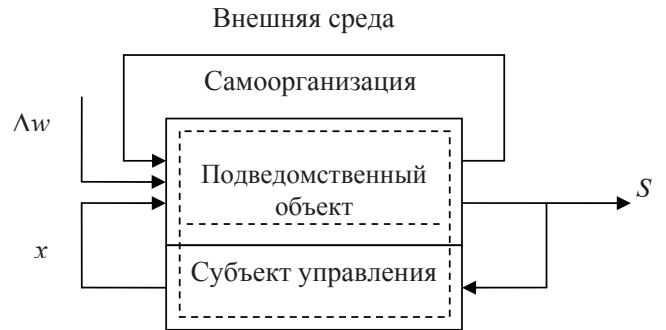


Рис. 2. Модель искусственной системы

$K_i \geq K_k$ – означает не строгое предпочтение, т. е. истинно утверждение: показатель с номером k не более предпочтителен, чем показатель с номером i ;

$K_i \sim K_k$ означает, что показатели с номерами i и k безразличны, точнее неверно, что i -й показатель предпочтительнее k -го и k -й показатель предпочтительнее i -го.

Безразличие имеет место в трёх случаях:
показатели действительно равнозначны;
оценщик затрудняется оценить сравнительную ценность показателей;
показатели принципиально несопоставимы, они из разных сфер жизни и т. д.

Например, считается аморальным сравнивать ценности затрат на жизнеобеспечение и шансы на выживание отдельного индивидуума.

Ранжировка формально в этом случае может быть задана отношениями в парах номеров показателей:

$$K_{i_\alpha} > K_{k_{i_\alpha+1}} \text{ или } K_{i_\alpha} \sim K_{k_{i_\alpha+1}}, \alpha = \overline{1, m-1},$$

где α – порядковый номер прежних номеров i показателей, но в ранжировке $\alpha = 1$ присваивается самому важному показателю.

При этом между показателями может быть строгое, нестрогое предпочтение или безразличие.

Кроме этого, ранжировку можно задать определённым расположением названия показателей либо столбцом, либо строкой. Далее используется представление ранжировки в виде столбца наименований или номеров показателей так, что верхнюю позицию занимает самый ценный показатель для данного индивидуума (группы), ниже – следующий по убыванию ценности и т. д. Имена (номера) безразличных по ценности показателей располагаются в одной строке. Один такой столбец записей называется индивидуальным профилем.

| V_1 | V_2 |
|---------------------------------------|--|
| ВВП ($i = 1$) | Социальная помощь ($i = 4$) |
| Промежуточное потребление ($i = 2$) | ВВП ($i = 1$); промежуточное потребление; ($i = 2$); расходы на управление ($i = 3$) |
| Расходы на управление ($i = 3$) | — |
| Социальная помощь ($i = 4$) | — |

Например, пусть имеется четыре показателя ($m = 4$). Два индивидуума ранжируют их следующим образом (см. табл.).

Для первого индивидуума самым ценным показателем является валовой внутренний выпуск (ВВП), затем «Промежуточное потребление ($i = 2$)» и «Расходы на управление ($i = 3$)». Наименее значимым для него является показатель «Социальная помощь ($i = 4$)». Для второго индивидуума самым значимым является показатель «Социальная помощь ($i = 4$)». Менее значимыми и безразличными являются показатели «ВВП ($i = 1$)», «Промежуточное потребление ($i = 2$)», «Расходы на управление ($i = 3$)». Ясно, что эти две ранжировки сильно отличаются.

На языке символов это можно записать в виде

$$V_1 : K_1 \succ K_2 \succ K_3 \succ K_4,$$

$$V_2 : K_4 \succ (K_1 \sim K_2 \sim K_3).$$

Аксиома 2. Мера $h_{j,k}$ рассогласования ранжировок V_j и V_k индивидуумов (групп) j и k должна отвечать условиям нормирования

$$0 \leq h_{j,k} \leq 1, \quad (1)$$

где 0 имеет место в случае полного согласования интересов j -го и k -го индивидуумов (групп); 1 – полного рассогласования интересов;

симметрии

$$h_{j,k} = h_{k,j};$$

неравенства треугольника: $h_{j,k} \leq h_{j,z} + h_{k,z}$, z -й индивидуум (группа) имеет интересы, промежуточные между интересами j -го и k -го индивидуумов.

Остальные аксиомы сформулированы Кемени – Снеллом [4]. Доказано, что при истинности аксиом существует единственная функция (расстояние между ранжировками V_j и V_k), которая запишется в виде

$$d(V_j, V_k) = \sum_{(i,t)} \beta_{i,t}(V_j, V_k), \quad (2)$$

$$\left| \begin{array}{l} 2, \text{ если в ранжировках } \\ V_j \text{ и } V_k \text{ пара } (i,t) \\ \text{имеет противопо-} \\ \text{ложную ранжировку,} \\ K_i \succ K_t \text{ в одной} \\ \text{ранжировке и } K_t \succ K_i \\ \text{в другой ранжировке,} \\ \beta_{i,t}(V_j, V_k) = \\ 1, \text{ если пара } (i,t) \text{ в одной} \\ \text{ранжировке связана} \\ \text{строгим предпочтением,} \\ \text{а в другой – безразличием,} \\ 0, \text{ если пара } (i,t) \text{ одинаково} \\ \text{проранжирована в } V_j \text{ и в } V_k, \\ \text{либо } K_i \succ K_t, \text{ либо } K_t \succ K_i, \\ \text{либо } K_t \approx K_i. \end{array} \right. \quad (3)$$

В приведённом выше примере ранжировок V_1 и V_2 имеется $C_4^2 = 6$ возможных пар отношений показателей, отличающихся хотя бы одним элементом: $\{i = 1, i = 2\}, \{i = 1, i = 3\}, \{i = 1, i = 4\}, \{i = 2, i = 3\}, \{i = 2, i = 4\}, \{i = 3, i = 4\}$, если не принимать во внимание порядок следования номеров показателей.

Для приведённого ранее примера двух ранжировок имеем:

$\beta_{1,2} = 1$, так как в ранжировке V_1 первый показатель строго предпочтительнее второго показателя, а в V_2 они безразличны;

$\beta_{1,3} = 1$ по указанной выше причине;

$\beta_{1,4} = 2$, так как в ранжировке V_1 первый показатель строго предпочтительнее четвертого показателя, а в V_2 – наоборот.

Аналогично устанавливаем: $\beta_{2,3} = 1, \beta_{2,4} = 2, \beta_{3,4} = 2$.

В результате получим

$$d(V_1, V_2) = 4 + 3 + 2 = 9.$$

Наибольшее возможное значение функции $d(V_j, V_k) = 2C_m^2$ будет тогда, когда значение расстояния для любой пары номеров показателей их ранжировки в V_j и V_k противоположны.

Тогда мера рассогласования интересов индивидуумов (групп) $h_{j,k}$ в соответствии с аксиомой 2 должна вычисляться как

$$h_{j,k} = \frac{1}{2C_m^2} d(V_j, V_k). \quad (4)$$

Эта мера единственная. Во-первых, согласно доказательствам Кемени–Снелла расстояние $d(V_j, V_k)$, вычисляемое по формулам (2) и (3), – единственная функция, отвечающая аксиомам Кемени–Снелла. Во-вторых, требование $0 \leq h_{j,k} \leq 1$ не противоречит требованию аксиомы Кемени–Снелла $d(V_j, V_k) \geq 0$. Отсюда следует справедливость утверждения о единственности меры $h_{j,k}$ в форме (4).

Мера рассогласования индивидуумов отвечает условию (1), т. е. она неотрицательна и принимает наибольшее значение, равное единице, тогда и только тогда, когда сравниваемые интересы двух индивидуумов или групп действительно имеют прямо противоположные оценки предпочтения в каждой паре показателей.

Величина $h_{j,k}$ есть оценка доли пар номеров имён показателей, имеющих противоположную или несхожую ценность для двух индивидуумов (групп): у одного индивидуума в данной паре показателей строго предпочтительным является первый в паре номер, у другого – второй номер (имя) показателя, или у одного пары показателей связана отношением, а у другого – строгим предпочтением, т. е. нет полного сходства.

Продолжим рассмотрение примера. Всего пар, различающихся хотя бы одним номером показателей, $C_4^2 = 6$. Тогда $h_{1,2} = \frac{1}{2 \cdot 6} 9 = 0,75$, т. е. имеет место согласование лишь четверть от общего числа пар. Такая характеристика говорит о низком уровне согласования ценностей показателей двумя индивидуумами.

Выше предложена мера рассогласования интересов пары индивидуумов (группы) при организации их действий с ориентацией на оптимизацию значений имеющейся совокупности показателей. Тем самым решена задача «б», сформулированная ранее.

Однако это ещё не решает задачу формирования методов диагностики состояния процессов самоорганизации и их возможного влияния на деятельность системы.

Диагностика состояния самоорганизации и уровня согласования с интересами субъекта управления на формальном уровне может быть сведена к процедуре вычисления меры согласования интересов субъекта и объекта управления. Обозначим эту меру $h_{c,o}$, где c – это субъект управления, а o – объект управления. V_c – это

ранжировка основных показателей, описывающих степень достижения целей и задач системы, а V_o – ранжировка показателей, отражающих интересы объекта управления или подведомственного объекта.

Если совокупность показателей, входящих в ранжировку V_c , и сама ранжировка известны субъекту управления, то формирование перечня показателей, которые надо включить в ранжировку V_o – сложная проблема.

Первое препятствие – это латентный до определённого времени характер оценок удовлетворённости положений отдельных индивидуумов в системе. Второе препятствие – трудная формулируемость таких оценок, т. е. затруднение отдельными индивидуумами формулировки сути претензий, недовольства в виде показателей, меняющихся от условий. Третье препятствие – многочисленность индивидуальных оценок. Сведение оценок удовлетворения / неудовлетворения своим положением в системе многих индивидуумов в одну – это проблема многокритериальности: в формуле (4) предусматривается всего одна ранжировка (в данном случае ранжировка V_o), а в реальной жизни индивидуумов, входящих в объект управления, может быть очень много. Эта проблема решается в теории групповых решений, входящей компонентом в теорию полезности [5].

Основными моментами подхода к диагностике состояния самоорганизации объекта управления как фактора, потенциально снижающего качество управления системами, являются:

диагностика осуществляется периодически (по аналогии с регламентными работами, предусматриваемыми при эксплуатации сложной техники), а также при систематическом расхождении и ожидаемых и достигаемых реально результатов функционирования, превышающем установленные для этой цели нормы;

исходными данными для диагностики служат результаты социологического опроса членов объекта управления (для этого используется организация опроса, рекомендуемая в социологии [6]);

данные социологического опроса о предпочтениях индивидуумов кластеризуются так, чтобы множество элементов объекта управления было разделено на классы, внутри которых мера согласования отличалась не более чем на заданную величину;

диагноз состояния самоорганизации формулируется в терминах теории нечётких множеств:

состояние самоорганизации и уровень её противостояния интересам субъекта управления считаются лингвистической переменной;

«значения» лингвистической переменной принадлежат набору нечётких множеств – градаций

порядковой шкалы со значениями функции принадлежности к каждой такой градации уровня противостояния, аргументом которой являются значения меры рассогласования интересов членов класса и субъекта управления, а также градации ранжированы в порядке возрастания уровня противостояния самоорганизации управлению;

по результатам социологического опроса каждому классу индивидуумов объекта управления (подведомственного объекта) ставится в соответствие значение меры рассогласования как средняя для класса с интересами субъекта управления, а по ним согласно правилам нечёткого вывода [7] делается вывод: к какому или каким градациям уровня противостояния относится оценка каждого класса индивидуумов;

одним из способов многокритериальной оценки уровня противостояния объекта управления интересам субъекта управления является выведение итоговой оценки как одной из градаций лингвистической переменной – уровня противостояния интересов объекта и субъекта управления.

Заключение. Таким образом, представлена принципиальная схема диагностики состояния самоорганизации объекта управления (подведомственного объекта) как фактора, влияющего на качество управления системами. Сформулированы аксиомы, на основании которых может быть найдена соответствующая мера рассогласования/со-

гласования в соответствии с методами Кемени–Снелла.

Дальнейшие исследования требуют применения и других методов получения соответствующих мер рассогласования/согласования интересов объекта и субъекта управления, например методов, использующих аксиомы Эрроу.

Библиографические ссылки

1. Карпичев В.С. Организация и самоорганизация социальных систем. Словарь. М.: Изд-во РАГС, 2007. 282 с.
2. Садовский В.Н. Основание общей теории систем. М.: Наука, 1974. 249 с.
3. Лавреш И.И. Основные свойства самоорганизации объектов управления и подведомственных объектов искусственных систем / В.В. Грибанов, И.И. Лавреш, В.П. Чесноков // VIII Conferință Internațională BIT+ «Tehnologii informaționale – 2008», 25–27 apr. 2008, Chișinău Ch.: MoldInfoNet, 2008. С. 113–116.
4. Роберте Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. 496 с.
5. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. М.: Наука, 1978. 352 с.
6. Ядов В.А. Социологическое исследование: методология, программа, методы. Самара: Самар. ун-т, 1995. 328 с.
7. Федулов Ю.Г., Юсов А.Б. Социальная политика: формализация, измерение, прогнозирование. М.: ООО «Агентство социальный проект», 2007. 384 с.

Ю.И. Головин

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ
И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

«Издательство»

НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Ю.И. Головин

2009. – 312 с.: ил. ISBN: 978-5-94275-476-1

Цена 693 р.

Описаны принципы, методы и средства для реализации испытаний и определения механических свойств материалов вnanoшкале, которые получили в последние годы большое распространение под общим названием “nanoиндентирование”. Обсуждены информационные возможности этого большого и многофункционального семейства методов nano- и микромеханических испытаний. Рассмотрены различные аспекты и

особенности поведения твердых тел в условиях сильно стесненной деформации, возникающей при локальном нагружении поверхности микронагрузкой. Описаны способы извлечения механических характеристик тонких приповерхностных слоев разнообразных материалов, пленок и многослойных покрытий при локальном нагружении. Особое внимание удалено физическим механизмам деформации и разрушения в этих условиях.

Книга адресована научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся созданием, исследованием и аттестацией новых наноструктурных материалов и систем, полезна студентам и аспирантам, обучающимся по направлениям нанотехнологии и наноматериаловедения.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Строгий пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 001.891.573

С.В. Мальцева, д-р техн. наук, проф., Д.С. Проценко
(Государственный университет – Высшая школа экономики, г. Москва)

dprotsenko@hse.ru

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ СЕТЕВЫМ СООБЩЕСТВОМ ПРАКТИКИ

Рассмотрены вопросы создания математического, информационного и программного обеспечения для управления сетевыми сообществами практики. Предложена математическая модель сообщества, рассмотрено её использование как основы для реализации основных функций системы управления в контексте совершенствования взаимодействия участников сообщества и формирования предметной области сообщества.

Ключевые слова: сетевое сообщество практики, математическая модель, программное обеспечение.

Creature questions of the mathematical, informational and programming support for the practice network community control are considered. Community mathematical model is proposed. This model utilization as basis for realization of the control system principal functions in the context of the participant interaction improvement and object community regions forming is considered.

Key words: practice network community, mathematical model, software.

Введение. Современное состояние сети Интернет и перспективы её развития связаны не только с появлением новых концепций сети, но также с созданием новых методов и технологий, определяющих реализацию этих концепций. Для концепции Web 2.0, предполагающей развитие ресурсов сети, формируемых за счёт пользовательского контента, важными являются новые модели и методы коллективного создания, использования и анализа контента. В полной мере эти задачи должны быть реализованы в программном обеспечении сетевых сообществ. В последние несколько лет в деятельность сетевых сообществ вовлечены миллионы пользователей. По данным аналитического сервиса comScore World Metrix [1] с июня 2006 г. по июнь 2008 г., у семи крупнейших мировых социальных сетей резко увеличилось общее количество уникальных пользователей. Например, за два года портал MySpace продемонстрировал прирост числа пользователей на 75 %, в результате чего его аудитория составила 117 млн человек, а число пользователей портала Facebook выросло на 423 %, составив аудиторию в 131 млн человек.

Одной из форм сетевых сообществ являются сообщества практики (Community of Practice), объединяющие специалистов, заинтересованных в приобретении и развитии знаний в определённой области и использовании их на практике. Появление таких сообществ отражает важную тенденцию трансформации сообществ из среды общения в среду формирования коллективного знания, которое начинает играть значительную

роль в различных сферах деятельности. Подтверждением этого является то, что сетевые сообщества создаются не только в Интернете, но и в сфере традиционного бизнеса. Компании создают свои внутренние сетевые сообщества как средство управления знаниями внутри компаний. Платформы для реализации сетевого сообщества внутри компании представлены такими продуктами, как Microsoft Share Point Portal Server, BEA WebLogic Portal, IBM WebSphere Portal, OracleAS Portal.

Сообщества практики позволяют объединить учёных и практиков, компетентных в определённой предметной области по всему миру. Одной из организационных форм научного сетевого сообщества являются сети мастерства (Network of Excellence), представленные в Европе как специфический инструмент, разработанный в шестой и седьмой рамочных европейских программах для создания единого европейского пространства [2]. Объединение участников сети мастерства направлено на достижение долгосрочной и прогрессивной интеграции исследовательского потенциала участников, а также на получение научных результатов.

Обычно выделяют следующие факторы, которые определяют функционирование и развитие сетевого сообщества:

- наличие чётко обозначенной тематики сообщества;
- соответствие тематики и интересов участников сообщества;
- наличие средств и инструментов для управления сообществом;

возможность определять и учитывать при управлении сообществом характер отношений между членами сообщества, отношение членов сообщества к темам обсуждения, мероприятиям и т. д.

Учитывая специфику сетевых сообществ практики как инструмента формирования коллективных знаний, управление ими следует рассматривать в двух аспектах: управление информационной средой функционирования сообщества и управление знаниями сообщества. Наиболее перспективным является интегрированный подход к управлению, позволяющий учесть оба аспекта.

Сегодня существует большое количество оригинальных и стандартных решений и инструментальных средств для создания и управления информационной инфраструктурой сообщества. Решение многих вопросов, связанных с созданием и развитием базы знаний сообщества, предложено в проекте «Semantic Web» [3] международной организации World Wide Web Consortium (W3C).

Предлагаемый подход к созданию интегрированной системы управления сообществом основывается на создании и использовании модели сообщества практики, представляющей собой объединение инфологической и онтологической моделей.

Важной особенностью сообществ практики является то, что основой и результатом их существования является формирование и развитие определённой предметной области, которую называют доменом сообщества практики, представляющего собой область знаний, определяющую интересы членов сообщества, стимулирующую их общение и включающую основные проблемы, решением которых они занимаются. Основной целью управления сообществом является развитие домена сообщества. Это определяет необходимость применения таких методов и механизмов управления сообществом, которые позволяли бы учитывать семантические связи между объектами сообщества. Под объектом сообщества понимается любой структурный компонент сообщества или протекающие в нём процессы. Таким образом, формирование и развитие домена сообщества происходит на основе анализа информации, связанной с объектами сообщества и их взаимодействием. Это определяет основные задачи, решение которых должна обеспечивать программная инфраструктура сообщества и заложенные в её основу модели: формирование и развитие домена сетевого сообщества, возможность семантической интеграции участников сообщества на основе единого понятийного аппарата, соответствие тематики и интересов участников сообщества, эффективное управление сообществом в контексте развития знаний о его предметной области.

Разработка модели сообщества основывается на его рассмотрении как сложной многоуровневой иерархической системы, состоящей из ряда подсистем (технической, программной, информационной, семиотической, лингвистической, семантической, административной), совместное функционирование которых проявляется в виде процессов создания и потребления информации и знаний в определённой предметной области. В соответствии с теорией таких систем [4] наиболее важным является рассмотрение трёх основных аспектов описания сообщества: построение иерархии абстрактных моделей, определение уровней иерархии сложности принятия решений и формирование организационной иерархии.

С точки зрения различных уровней абстрагирования сетевое сообщество практики представляется семейством концептуальных моделей, каждая из которых описывает его поведение и структуру в рамках независимых (между уровнями) законов, принципов и понятий. При декомпозиции сетевого сообщества практики можно выделить следующие основные уровни: информационный, семантический и функциональный, на каждом из которых используются разные модели сообщества.

Модель сетевого сообщества практики на определённом уровне является одновременно и описанием некоторой её подсистемы, вычленяемой из исходной системы в соответствии с абстрактной декомпозицией.

Использование моделей для создания программного инструментария управления сообществом делает необходимым определение организационной иерархии и установления связей между элементами уровневой и организационной иерархией.

Организационная иерархия существующих Web-ресурсов сетевых сообществ практики имеет, как правило, трёхуровневую структуру, в которой можно выделить следующие уровни: информационный объект, информационный кластер и информационную область. Разрабатываемые модели сетевого сообщества практики на всех уровнях должны иметь одинаковую организационную структуру.

На информационном уровне рассматривается только совокупность информации, представляющая информационное пространство сетевого сообщества и определяющая занимаемую им область. Эта информация используется в процессах формирования контента сайта сетевого сообщества, его администрирования и информационного обеспечения формирования семантической подсистемы, являющейся информационной подсистемой сетевого сообщества.

На этом уровне определим понятие информационного объекта, под которым понимается совокупность информации, описывающаяся в терминах информационного уровня и не зависящая от свойств семантической подсистемы сетевого сообщества. Таким образом, информационный объект представляет собой неделимое на другие, более низкие с точки зрения уровней организационной иерархии понятия. Примерами информационных объектов является совокупность информации, связанная с объектами сети – пользователями, проектами, мероприятиями и т. д. На более высоком уровне иерархии эта информация объединяется в кластеры, которые описывают определённые информационные группы. Объединение информационных кластеров составляет информационную область сообщества практики.

На семантическом уровне рассматривается совокупность знаний, порождающихся функционированием сообщества практики. На этом уровне объект сообщества абстрагируется от физической или абстрактной сущности и заменяется семантической моделью на основе содержания связанного с ним информационного элемента и общих для всех компонент сообщества формальных правил представления её смысла.

Формируемая на этом уровне семантическая подсистема выражает смысл модели первичной информационной подсистемы, а также процессов управления знаниями сообщества, обеспечивая целенаправленность протекания информационных и организационных процессов в первичной подсистеме в соответствии с определёнными целями функционирования сообщества.

На функциональном уровне рассмотрению подлежит описание алгоритмов операций по обработке информации и знаний, реализующих основные сервисы сообщества.

На информационном уровне используется инфологическая модель, позволяющая отразить иерархию информационных объектов сообщества: информационный элемент, информационный кластер, информационную область.

На семантическом уровне каждому из информационных объектов ставится в соответствие семантический объект – контейнер знаний, тематический домен и домен сообщества. Для представления объектов на семантическом уровне используется онтологическая модель.

На функциональном уровне для каждого из выделенных уровней иерархии определяется сервисный объект – контейнер знаний, тематический домен, домен сообщества.

Объектный подход к формированию инфологической модели сетевого сообщества практики на всех уровнях иерархии позволяет представить

её в форме теоретико-множественной модели вида

$$M_1 = \langle K, A, R, W, Z_{KA}, Z_{RW} \rangle, \quad (1)$$

где $K = \{k_i | i = 1, \dots, N\}$ – множество классов объектов сетевого сообщества; k_i – i -й класс объекта сетевого сообщества; $A = \{a_i | i = 1, \dots, N\}$ – множество атрибутов классов $A = \bigcup_{i=1}^N A_i$; $A_i = \{a_{ilq} | l_q = 1, \dots, N_p\}$ – множество атрибутов i -го класса; $R = \{r_j | j = 1, \dots, M\}$ – множество связей между классами объектов; r_j – j -е отношение между компонентами (k_1, k_2) множества K ; $W = \{w_j | j = 1, \dots, M\}$ – множество атрибутов связей $W = \bigcup_{j=1}^M W_j$; $W_j = \{w_{jk_p} | k_p = 1, \dots, M_j\}$ – множество атрибутов i -го класса; $Z_{KA} : A \rightarrow K$ – отображение множества атрибутов классов на множество классов; $Z_{RW} : W \rightarrow R$ – отображение множества атрибутов связей на множество связей.

В этой модели объекты сетевого сообщества рассматриваются как экземпляры классов, а связи между ними как экземпляры связей между классами.

Инфологическая модель является наиболее распространённой основой для разработки базы данных при создании программного обеспечения администрирования сообщества. Её недостатком для моделирования сообщества практики является то, что она ориентирована в основном на поддержку процессов информационного обмена между объектами сообщества, а не их семантической интероперабельности.

Для моделирования предметной области в контексте основной цели сообщества практики использован инструментарий онтологического моделирования. На семантическом уровне формируются модели предметных областей разных уровней иерархии на основе онтологий. Важным требованием к модели является возможность её интеграции с инфологической моделью.

Онтологическая модель сообщества на всех уровнях иерархии представлена парой

$$M_2 = \langle D, C \rangle, \quad (2)$$

где $D = \{d_k | k = 1, \dots, K\}$ – множество понятий предметной области; d_k – k -е понятие; $C = \{c_l | l = 1, \dots, L\}$ – множество связей между понятиями; c_l – l -я связь между понятиями.

Связь между инфологической (1) и онтологической (2) моделями сообщества осуществляется внесением в онтологическую модель знаний о структуре объектов сообщества, а также понятий и связей между ними. Структура задаётся инфо-

логической моделью, множество понятий и связей формируется на основе анализа информации объектов сообщества, задаваемой значениями атрибутов классов объектов, а также информации о связях между объектами, задаваемой значениями атрибутов связей между классами. Это позволяет совместить онтологию задач, задаваемую инфологической моделью, с онтологией предметной области.

Для отображения в онтологии структуры инфологической модели выделим из множества A подмножество $A_K \subset A$ – наименований классов; из множества W подмножество $W_R \subset W$ – наименований связей между классами. Дополнив модель (1) множеством параметров атрибутов классов B и множеством параметров атрибутов связей между классами T , выделим из множества B подмножество $B_A \subset B$ – наименований атрибутов классов и из множества T подмножество $T_R \subset T$ – наименований атрибутов связей между классами.

Тогда подмножество понятий онтологической модели $D_1 \subset D$, описывающее структуру инфологической модели, $D_1 = A_K \cup W_R \cup B_A \cup T_R$.

Подмножество связей между понятиями онтологической модели $C_1 \subset C$, описывающее структуру связей инфологической модели, включает E_{1K} – множество связей между понятиями-наименованиями классов, E_{2K} – множество связей между понятиями-наименованиями классов и понятиями-атрибутами классов, E_{3K} – множество связей между понятиями-наименованиями связей и понятиями-наименованиями классов, E_{4K} – множество связей между понятиями-наименованиями связей и понятиями-атрибутами связей $C_1 = E_{1K} \cup E_{2K} \cup E_{3K} \cup E_{4K}$.

В инфологической модели объекты сообщества представлены как экземпляры классов. В то же время инфологическая модель, как правило, наряду с классами, описывающими реальные объекты сообщества, содержит классы вспомогательных объектов, необходимых для описания процессов внутри сообщества, которые не несут информации о предметной области.

Выделим в модели (1) множество информационных объектов, обладающих знаниями о предметной области:

$O = \{o_{i_O} | i_O = 1, \dots, N_O\}$ – множество информационных объектов сообщества, где o_{i_O} – i_O -й объект;

$K_I = \{k_{i_O} | i_O = 1, \dots, N_O\}$ – множество классов информационных объектов сообщества, где k_{i_O} – класс, к которому принадлежит i_O -й объект; $K_I \subset K$.

Для множества K_I введём множество механизмов классов: $X_I = \{x_{i_O} | i_O = 1, \dots, N_O\}$, где x_{i_O} – механизм i_O -го класса, задающий функцию $f_{i_O}: o \rightarrow$

$\langle D, C \rangle$ отображения объекта o , принадлежащего к классу k_{i_O} на множества онтологической модели предметной области сообщества D и C , $X_O \subset X$, где X – множество всех механизмов классов модели M_1 . Механизм класса преобразует инфологическое представление объекта в онтологическую модель объекта

$$M_o = \langle D_o, C_o \rangle,$$

где $D_o \subset D$, $C_o \subset C$.

Дополним множество классов K модели M_1 множеством понятий D онтологии M_2 , рассматривая их как отдельные классы, для которых введём множество A_D , расширяющее выразительные возможности онтологии. Пусть $K' = K \cup D$. Аналогично дополним множество связей между классами R множеством связей между понятиями онтологии C , для которых введём множество W_C – атрибутов связей между понятиями онтологии. Пусть $R' = R \cup C$; расширенное множество атрибутов классов $A' = A \cup A_D$; расширенное множество атрибутов связей $W' = W \cup W_C$. Введём новые отображения: $Z_{K'A'}: A' \rightarrow K'$ – отображение множества атрибутов классов на множество классов; $Z_{R'W'}: W' \rightarrow R'$ – отображение множества атрибутов связей на множество связей.

Тогда модель сообщества практики запишется в виде

$$M_3 = \langle K', A', R', W', Z_{K'A'}, Z_{R'W'}, O, K_I, X_I \rangle. \quad (3)$$

На каждом из уровней иерархии объекты сообщества представляются аналогичной моделью, компоненты которой являются подмножествами множеств модели M_3 . Это позволяет развивать модель сообщества «снизу вверх», проводя мониторинг изменений информационных объектов и доменов объектов, разрыва между доменом сообщества и совокупностью доменов его объектов, что является одной из проблем сетевых сообществ.

Описанные выше модели определяют содержание функциональной подсистемы, реализующей основные алгоритмы управления сообществом.

Основными компонентами функциональной подсистемы являются сервисы, определяющие функционирование сообщества на всех уровнях организационной иерархии. Сервисы сообщества позволяют обрабатывать информацию сообщества, представленную в семантической подсистеме.

Сервисы функционального уровня включают: механизмы преобразования инфологических моделей в онтологические;

сервисы, использующие семантическое подобие описаний объектов, групп, сообщества.

Так как особенностью сообщества является отсутствие чётко определённых процессов, основу его функционирования составляет совместное использование сервисов объектами сообщества.

Набор сервисов, который составляет ядро программного инструментария управления сообществом в контексте решения задач семантической интеграции объектов сетевого сообщества, обеспечивает решение следующих задач:

установление отношений между объектами внутри сообщества;

установление отношений между внутренними и внешними объектами;

формирование групп из множества внутренних объектов в соответствии с задачами внутренних процессов сообщества;

формирование групп из множества внутренних объектов для задач, связанных с внешней информационной средой.

Отношения между объектами в данном случае интерпретируются как отношения сходства между онтологиями объектов. Особенностью этих отношений является то, что они определяются на основе тематического соответствия в рамках обозначенного домена сети.

Примером задачи, где требуется определение отношений между объектами сообщества, является составление списка рассылки информации о сетевом мероприятии (на основе сходства онтологии мероприятия и онтологий членов сети).

Решение задачи установления отношений между внешним и внутренними объектами требуется при включении нового ресурса в состав информационного обеспечения сети (оценка релевантности его тематики домену сообщества); при оценке тематики проекта, в котором предполагается участие членов сообщества (определение возможности участия в проекте и посылка информации о проекте заинтересованным членам сети); при приёме нового кандидата в члены сети (оценка соответствия тематики его работ домену сообщества).

Перечисленные функции являются базовыми, создающими основу для реализации других функ-

ций, связанных с обеспечением разнообразных сервисов для членов сети.

Сетевое сообщество управляется сочетанием ручного администрирования, которое может осуществляться как единым администратором, так и группой выделенных руководителей сообщества, и автоматизированных процедур, связанных с обработкой и подготовкой информации для администраторов. Основной задачей при этом является целенаправленное развитие знаний о предметной области сообщества и сохранение её границ. Для обеспечения этого сервисы функциональной подсистемы должны:

обеспечивать взаимосвязь между объектами сетевого сообщества;

формировать связи между пользователями сетевого сообщества, работающими по сходной тематике;

объединять членов сетевого сообщества по заданным направлениям деятельности;

предоставлять набор функциональных возможностей для пользователей, модераторов и администраторов;

иметь средства связи с другими модулями и средствами ввода и/или вывода информации;

иметь средства настройки и управления.

Заключение. Предложенная система моделирования структуры и процессов сетевого сообщества практики позволяет использовать её как основу для создания математического, информационного и программного обеспечения управления сообществами. Также данный подход может быть использован при управлении сообществами другого типа, в которых можно выделить тематически однородные группы участников.

Библиографические ссылки

1. Сайт Международной аналитической компании comScore. URL: <http://www.comscore.com>
2. Сайт Seventh Research Framework Programme (FP7). URL: <http://ec.europa.eu/research/fp7>
3. Сайт World Wide Web Consortium (W3C) W3C Semantic Web Activity. URL: <http://www.w3.org/2001/sw/>
4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,

можно найти на сайте www.mashin.ru



ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

Концептуальная математическая модель информационно-управляющего поля как среды функционирования смешанных групп ЛА. Полёт. 2010. № 7.

Предложена математическая модель единого информационно-управляющего поля, основу которой составляет матрица пространственно-временных состояний, имеющая трехуровневую структуру в виде комбинации так называемых структурной, информационной и ковариационной матриц. Показано, что в рамках подобной математической модели удаётся формализовать критерии, устанавливающие требования к перечню, составу и точностным характеристикам информационных потоков, циркулирующих в едином информационно-управляющем поле, выполнение которых создаёт предпосылки для успешного выполнения целевых задач смешанной группой ЛА.

Проектирование, эксплуатация и диагностика конструкций на основе концепции безопасных трещин. Контроль. Диагностика. 2011. № 7.

Рассмотрена проблема определения допускаемых дефектов типа трещин при обосновании работоспособности оборудования. Она решается с использованием усовершенствованных подходов линейной механики разрушения, приемлемых для больших и малых трещин, что позволяет включить в число базовых характеристик материалов, определяющих их усталостные свойства, условную начальную трещину. Параметр условной начальной трещины характеризует исходную дефектность материала и используется для определения допускаемых дефектов и требуемой чувствительности неразрушающих методов контроля.

Моделирование процессов формообразования плоских заготовок. Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 7.

Показаны возможности моделирования пространственной эпюры контактных давлений для определения параметров технологической выемки, используемой для регулирования потоков металла по полотну заготовки в процессах ковки. Приведены экспериментальные данные по осадке плоских заготовок в сопоставлении с результатами аналогового моделирования. Исследованы различные варианты расположения «жёстких концов» в деформируемых образцах.

Совершенствование конструкции распылителя форсунки дизеля. Грузовик. 2011. № 7.

Проведены экспериментальные исследования дизеля Д 245.12С, форсунки которого были оснащены распылителями с различной длиной распыливающих отверстий. Полученные экспери-

ментальные данные подтверждают возможность снижения удельного эффективного расхода топлива, показателей токсичности и дымности отработавших газов путём оптимизации длины распыливающих отверстий форсунок.

Отделочно-упрочняющая обработка деталей обкатовыглаживанием. Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 8.

Рассмотрена обработка деталей машин обкатовыглаживанием. Приведены схема обкатовыглаживания и авторская конструкция инструмента. Выявлено, что при обкатовыглаживании стойкость рабочей части индентора в 2–3 раза выше, чем при классическом выглаживании. Установлено, что достигаемые обкатовыглаживанием значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обработанной поверхности, микротвёрдость поверхности и остаточные напряжения сжатия первого рода соизмеримы с аналогичными параметрами, достигаемыми при классическом выглаживании.

Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой. Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 8.

Проведён анализ возможности технологического обеспечения качества нанесения покрытий, в частности за счёт применения комбинированных процессов для подготовки труднодоступной внутренней поверхности детали. Предложены пути и разработаны методы и средства технологического обеспечения требуемых эксплуатационных показателей рабочих поверхностей и покрытий для целого ряда ответственных деталей добычающей и транспортной техники.

Математическая модель расчёта несущей способности высокоскоростного шпиндельного узла на газомагнитной опоре. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 8.

Рассмотрено применение газомагнитных опор в высокоскоростных шпиндельных узлах металлорежущих станков. Предложена математическая модель определения эксплуатационных параметров шпинделя – несущей способности и восстанавливающего момента. Выполнен сравнительный анализ результатов расчёта и данных, полученных экспериментальным путём.

Выбор СОЖ для высокоскоростного протягивания. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 8.

Рассмотрены особенности воздействия смазывающе-охлаждающих жидкостей на условия реза-

ния при круговом протягивании наружных фасонных поверхностей. Приведены данные по оптимальным смазывающе-охлаждающим жидкостям для протягивания заготовок из конструкционных сталей по критериям «минимальная сила резания при протягивании», «минимальная шероховатость обработанной поверхности» и «наибольшая стойкость при различных скоростях резания».

Совершенствование конструкции и технологии изготовления сотовых уплотнений турбин для АЭС. Инженерный журнал «Справочник». 2011. № 8.

Рассмотрены последующие пути модернизации уплотнений турбин с использованием сотовых вставок, в частности ступенчатых уплотнений по валу, с выявлением конструктивных и технологических особенностей их изготовления с учётом опыта внедрения на турбоустановках для АЭС.

Технология электрохимического формообразования переходных участков высоконагруженных изделий. Инженерный журнал «Справочник». 2011. № 8.

Рассмотрены эффективные технологические методы устранения наиболее часто встречающихся при испытаниях дефектов силовых элементов изделий, особенно высоконапряжённых конструкций авиационной и космической техники, работающей в условиях многократных нагрузений и вибраций. Обоснованы режимы и возможности электрохимической размерной обработки при формировании переходных участков, которые могут стать концентраторами напряжений и вызвать нарушение работоспособности изделий в процессе предполётной (предстартовой) подготовки и при эксплуатации техники. Показаны пути повышения качества изделий за счёт снижения массы крепёжных элементов, имеющих заданные величины скругления переходных участков. Определена область рационального использования электрохимической и комбинированной обработки для повышения долговечности силовых элементов деталей машин.

Достижение универсальности ряда мобильных технологических процессов разделения металла. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 8.

Указанны преимущества системного подхода на основе прогнозирования реализации задач повышения надёжности и восстанавливаемости изделий машиностроения. Для обеспечения мобильных технологических процессов сверления и разрезания металла представлены традиционные средства технологического оснащения, взаимообусловленные типоразмерами изделий. На основе кумулятивного анодного растворения металла предложено функционально и конструктивно универсальное средство технологического оснащения, не обусловленное типоразмерами изделий.

Алгоритм метода параметрической идентификации дискомфортных режимов самолёта при полёте в турбулентной атмосфере. Полёт. 2010. № 8.

Предложен метод параметрической идентификации дискомфортных режимов полёта, позволяющий определить режимы, неприемлемые с точки зрения дискомфорта пассажиров и экипажа, в темпе протекающего полёта при воздействии вертикальных турбулентных порывов различной частоты и выработать рекомендации в виде подсказки экипажу для повышения комфортабельности полёта. Рассмотрена линеаризация заданной функции нескольких случайных величин. Заданы числовые характеристики системы в виде математических ожиданий и корреляционной матрицы. Даны формулы для дисперсий и средних квадратических отклонений случайных величин. Представлена компьютерная оценка точности метода параметрической идентификации дискомфортных режимов при моделировании динамики полёта пассажирского самолёта.

Формообразование деталей с утолщениями в режиме кратковременной ползучести. Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 8.

Приведены математические модели операций горячего выдавливания и высадки деталей с утолщениями в режиме кратковременной ползучести. Выполнена оценка кинематики, сил и сплошности материала при горячем выдавливании и высадке изделий. Использован энергетический метод расчёта для вязкопластического деформирования.

Применение аппарата нечёткой логики и нейронных сетей для управления техническим состоянием модулей движения технологического оборудования. Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 8.

Предложены методы диагностирования и прогнозирования состояния технологического оборудования с помощью аппарата нечёткой логики и нейронных сетей. Разработана структура системы управления техническим состоянием модуля по результатам диагностирования и прогнозирования. Подтверждены работоспособность и эффективность предлагаемых методов на примерах модулей движения робота и шахтного вентилятора главного проветривания.

Модель и алгоритм планирования транспортно-складских затрат при организации доставки грузов. Автомобильная промышленность. 2011. № 8.

Представлены модель расчёта и алгоритм формирования транспортно-складских затрат в прямых цепях поставок, которые позволяют достигнуть согласованности в транспортно-складских процессах и обеспечить обоснованное принятие управлеченческих решений.