

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОМАЗУТНЫХ ТОПЛИВ

Введение. Одним из актуальных вопросов энергосбережения в настоящее время является совершенствование технологий подготовки и сжигания жидких топлив. Специфической проблемой использования мазута является то, что при хранении и подогреве мазута перед использованием, как правило, получается продукт с повышенным содержанием влаги. В результате обводнения у мазута изменяются физико-химические свойства, что приводит к отклонению его рабочих характеристик от норм. Это может нарушать стабильность горения вплоть до обрыва факела и аварийной остановки оборудования, повышать недожог топлива, способствовать образованию несгоревших частиц кокса, загрязняющих поверхности нагрева. Также увеличиваются потери теплоты с уходящими газами, возрастает аэродинамическое сопротивление аппаратов, уменьшается теоретическая температура горения и теплоотдача в топке, и, следовательно, снижается КПД устройств. Помимо прочего, повышенное содержание воды в сернистых мазутах увеличивает коррозионное разрушение мазутопроводов и аппаратуры вследствие растворения в воде некоторых агрессивных сернистых соединений, таких как сероводород.

В то же время известно, что главной причиной, вызывающей трудности сжигания влажных жидких топлив, является не присутствие воды, как таковой, а ее неравномерное распределение в массе топлива, как по высоте емкости, так и в пределах определенного слоя.

Следует заметить, что применяемые в настоящее время методы сжигания топлив, преследуя своей целью подавления образования NO_x , CO , SO_2 , способствуют усиленному образованию высокомолекулярных углеводородов $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$. А наличие в дымовых газах бензапирена или диоксинов значительно опаснее для биосферы, чем выбросы NO_x или SO_2 .

Именно такой вид составляющих и вызывают нежелательные эффекты при сжигании обводненного топлива.

© Радченко Ю.Н., Карпенко А.А., 2006



Поскольку вода и жидкие топлива, в том числе и мазуты, взаимно нерастворимы, то на их основе можно создать только эмульсию. Высокоустойчивые концентрированные эмульсии, как показали исследования П.А. Ребиндера [1], получаются путем образования на внешней поверхности капелек, то есть на границе раздела фаз, тончайшего коллоидно-адсорбционного слоя эмульгатора, предотвращающего слияние капелек и таким образом повышающего устойчивость эмульсий. Упругая тонкая пленка (например, сольватная прослойка) между дисперсными частицами ограничивает действие сил сцепления между капельками, что способствует стабилизации эмульсий.

Результаты исследований. В результате термомеханической обработки исходных мазутов нами были получены водо-мазутные эмульсии, в которых равномерно по объему распределена вода (дисперсная фаза) в виде капель диаметром от 5 до 150 мкм в количестве 10 – 25 % по объему. Затем ВМЭ сжигались в топке лабораторного стенда,

при этом производили замеры температуры и состава продуктов сгорания по длине камеры сгорания.

Проведенные исследования показали, что ВМЭ быстро воспламеняется, причем процесс горения принимает сразу же устойчивый характер, не нарушающийся даже при коэффициенте расхода воздуха $n=1,2$. Процесс сгорания топливных эмульсий в основном завершался в пределах топочной части камеры горения. По окончании опытов, как в топочной части, так и за ее пределами не было заметно следов сажи и кокса. Об интенсивности процесса горения ВМЭ можно судить по распределению температур в топке камеры. График распространения температур приведен на рисунке 2.

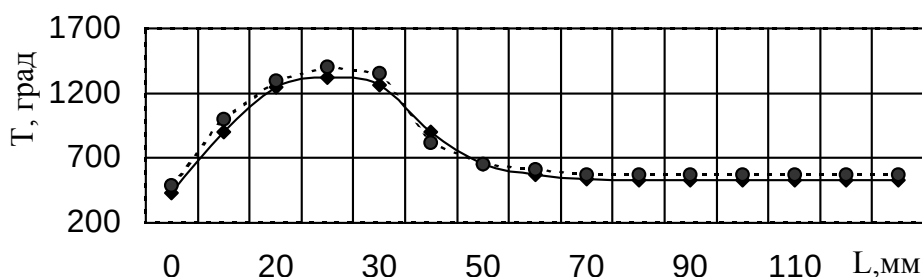


Рис. 2 – Распределение температур по длине камеры горения при сжигании эмульсии

Было установлено, что при влажности жидких топлив в пределах до 20 % не происходит резкого снижения показателей топочного процесса. Поэтому применение ВМЭ целесообразно и для различных видов технологических печей.

Качество эмульсии и ее устойчивость определяются следующими факторами: вязкостью; дисперсностью; активностью поверхностно-активных веществ .

Отдельно следует заметить, что вязкость также определяет затраты энергии на перемещение эмульсии, и влияет на качество распыливания жидкого топлива.

Экспериментально доказано, что на вязкость ВТЭ сильно влияет концентрация воды в эмульсии. Вязкость приготовленной ВТЭ выше, чем вязкость исходного топлива [2], причем, чем выше содержание воды в эмульсии, тем выше ее вязкость. Зависимость вязкости ВМЭ от температуры и влажности показаны на рисунке 3.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при температуре 20 °C вязкость эмульсий с увеличением концентрации воды с

10 % до 30 % резко возрастает. Но по мере увеличения температуры значение вязкости уменьшается, и при температурах выше 80 °С вязкость эмульсий влажностью 10 % мало отличается от эмульсий с влажностью 30 %. Следовательно, при температурах, которые обычно поддерживаются для мазута перед поступлением в форсунку (80 – 120 °С), вязкость эмульсий будет мало отличаться от вязкости исходного мазута и практически не будет оказывать влияния на качество распыла, что позволяет при сжигании ВМЭ пользоваться той же аппаратурой, что и при сжигании не обводненных мазутов.

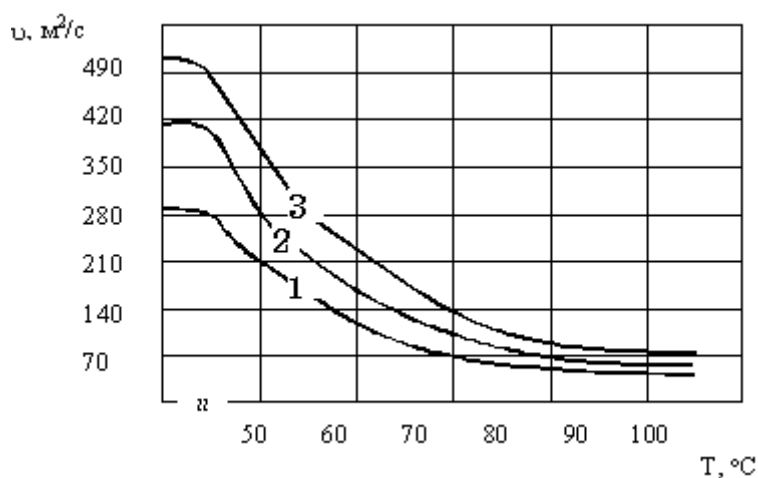


Рис 3 – Зависимость вязкости водо-мазутной эмульсии М-40 от температуры при различной влажности: 1 – $W^p = 10\%$; 2 – $W^p = 20\%$; 3 – $W^p = 25\%$.

Дисперсность эмульсий, то есть величина поверхности раздела дисперсной фазы, прежде всего, характеризует равномерность распределения воды в массе топлива и влияет на устойчивость собственно эмульсии, ее вязкость, электропроводность и само горение. Чем выше дисперсность, тем равномернее распределена вода в топливе, устойчивее эмульсия и выше ее качество.

Дисперсность зависит от плотности, вязкости, поверхностного натяжения перемешиваемых жидкостей, от количественного соотношения и способа получения ВМЭ.

Выводы. Исследования показали, что эмульгирование мазутов водой существенно улучшает и стабилизирует процессы сжигания топлива, сокращает количество вредных выбросов с продуктами сгорания. При этом упрощается подготовка мазута к сжиганию, поскольку с помощью прогнозируемых объемов дискретной фазы и ПАВ можно управлять качеством эмульсии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. - М.: Наука, 1979.– 381 с.
2. Ахмедов Р.Б., Цирюльников Л.М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. Л., Недра, 1984 – 238 с.

Получено 17.02.2006 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Введение

Интенсификация техногенеза привела к нарушению естественных гидродинамических и гидрогеохимических режимов, особенно в районах с развитой горнодобывающей промышленностью и энергетикой. Отличительной чертой загрязнения подземных вод в этих районах является многокомпонентность смесей, мигрирующих в фильтративно-неоднородных массивах пород [1], что существенно осложняет математическое описание подземного массопереноса. В то же время имеющие практическую значимость алгоритмы численного моделирования разработаны главным образом для исследования миграции не взаимодействующих между собой веществ. Для изучения массопереноса многокомпонентных смесей в подземных водах может быть использована следующая система уравнений тепломассопереноса, базирующаяся на понятиях механики сплошной среды.

Результаты исследований

Наиболее распространенное в реальных условиях ламинарное течение флюида в водонасыщенных пористых средах описывается уравнением неразрывности, законом Дарси, а также уравнением состояния [4;5]:

$$\operatorname{div}(\rho V) = -\frac{\partial(\rho n)}{\partial t}, v = -\frac{k_0}{\mu}(\operatorname{grad} p + \rho g \operatorname{grad} z) \quad (1)$$

$$\rho = \rho(T, p, C_\Sigma), \mu = \mu(T, p, C_\Sigma) \quad (2)$$

где: ρ , μ – плотность и динамическая вязкость флюида; n , k_0 – пористость и проницаемость породы; v – скорость фильтрации; p – давление; z – высота точки над плоскостью сравнения; T – температура жидкости; C_Σ – минерализация подземного раствора. Практически наиболее значимы зависимости от T , C_Σ и p , μ от T , n от p .

© Рядно А.А., Рудаков Д.В., 2006

Многокомпонентная смесь M мигрирующих веществ в геофилтрационном потоке рассматривается как совокупность взаимодействующих между собой химических соединений, причем скорости этого взаимодействия в жидкой и твердой фазах различны. Разные формы одного химического элемента (свободные ионы, комплексы), отличающиеся по сорбционным свойствам, с учетом экспериментальных данных, приведенных в [1], представлены в модели как разные вещества. Кроме того, каждый i -й компонент смеси в системе раствор – сорбент может находиться в трех состояниях: 1) в растворе, заполняющем поровое пространство; 2) в сорбенте в обменной форме (доступной быстрому обмену); 3) в сорбенте в необменной форме (относительно прочно фиксированной). Изменение содержания i -го вещества в разных формах может быть описано уравнениями [1;3;5]:

$$\operatorname{div}(D_i \operatorname{grad} C_i - v C_i) + P_i - (1 - n) \frac{\partial N_i}{\partial t} = n \frac{\partial C_i}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \varphi_i(C_1, \dots, C_m, N_1, \dots, N_m, N_1^*, \dots, N_m^*) + \bar{P}_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_i^*}{\partial t} = \psi_i(N_1, \dots, N_m, N_1^*, \dots, N_m^*) + \bar{P}_i \quad (5)$$

где: C_i , N_i , N_i^* – концентрации i -го компонента соответственно в растворе, в сорбенте в обменной и необменной формах; D_i – коэффициент гидродисперсии; P_i , $\bar{P}_i$, $\bar{P}_i^*$ – интенсивности поступления (убыли) i -го вещества за счет химических реакций между компонентами смеси в жидкой и твердой фазах; функции φ_i , ψ_i выражают кинетику массообмена.

Выделение двух форм компонента в твердой фазе, экспериментально подтвержденное неэквивалентностью процессов сорбции-десорбции [1;2], основано на следующем. Переход вещества из раствора в обменную форму твердой фазы и обратно обычно происходит за короткий промежуток времени (не более нескольких часов, что пренебрежимо мало по сравнению с длительностью процессов переноса) с небольшой энергией активации.

Описание такого массообмена возможно изотермами равновесной сорбции вида: $N_i = f(C_1, \dots, C_i, \dots, C_m)$. Для малоконцентрированных

растворов, в которых взаимодействием компонентов можно пренебречь, допустимо принять $N_i = K_{d,i} C_j$, где $K_{d,i}$ – коэффициент распределения. Это позволяет объединять уравнения (3) и (4).

Переход вещества из обменной формы в необменную (и наоборот) в твердой фазе, совершается в результате установления (разрыва) прочных химических связей между молекулами вещества и сорбента и происходит при большой энергии активации [1]. Массообмен такого типа протекает значительно медленнее, что требует учета его кинетики. Это может быть сделано с помощью уравнения обратимой реакции второго порядка:

$$\frac{\partial N_i^*}{\partial t} = \gamma_{i,1} N_1 (N_{i,0}^* - N_i^*) - \gamma_{i,2} N_i^* (N_{i,0} - N_i), \quad (6)$$

где: $N_{i,0}^*$, $N_{i,0}$ – емкости предельного насыщения сорбента i -м веществом в обменной и необменной формах; $\gamma_{i,1}$, $\gamma_{i,2}$ – скорости реакций.

Совокупность химических реакций в гетерогенной системе, отраженная в модели членами $P_i, \bar{P}_i, \bar{P}_i^*$ может быть записана с помощью уравнения формальной кинетики [2]. Для наиболее распространенных загрязнителей (радионуклиды, тяжелые металлы, органические вещества) практически значимы: 1) реакции распада; 2) цепные реакции распада, сопровождающиеся образованием “дочерних” веществ; реакции образования нового вещества при взаимодействии двух других. Экспериментально определяемые параметры массообмена (γ_i , α_i и т.д.) зависят от pH, Eh, C_Σ , T и др. [1;2;3].

При существенных температурных градиентах в фильтрационном потоке уравнения (1)-(6) решаются совместно с уравнением теплопереноса:

$$\text{div}(\lambda \text{ grad } T - c_b \rho_b v T) + B = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

где: λ – коэффициент теплопроводности пористой среды; c_b, ρ_b, c_p, ρ – теплоемкости и плотности флюида и среды; B – внутренний источник тепла.

При формулировке граничных условий для уравнений теплопереноса принято соотношение $\frac{\partial N_i}{\partial s} \equiv \frac{\partial N_i^*}{\partial s} \equiv 0$ (s – вектор нормали к

границе области), справедливое в любой момент времени. С помощью начальных условий для N , N_i^* , задающих неравномерное распределение соответствующих форм i -го компонента, можно моделировать миграцию веществ из захоронений твердых отходов, находящихся в контакте с жидкостью.

Выводы

Решение системы (1)-(7) при соответствующих краевых условиях с учетом специфики исходных данных целесообразно проводить при следующих допущениях: 1) пространственная область тепломассопереноса заменяется системой взаимосвязанных слоев, в каждом из которых решается двумерная задача фильтрации и миграции M компонентов смеси; 2) уравнение фильтрации и теплопереноса решаются независимо от уравнений массопереноса, причем в большинстве случаев достаточно рассчитать стационарный режим фильтрации; 3) влияние теплопереноса на другие процессы отражается с помощью уравнений состояния (2); 4) массоперенос каждого компонента смеси описывается двумя уравнениями – (3) и (5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тютюнова Ф.И. Гидрогеохимия техногенеза. М., 1986.
2. Голубев В.С., Гарибянц А.А. Гетерогенные процессы геохимической миграции. М., 1968.
3. Лялько В.И. Тепломассоперенос в литосфере. К., 1985
4. Фрид Ж. Загрязнение подземных вод. М., 1981.
5. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Н.Н. Веригин, С.В. Васильев, В.С. Саркисян и др. М., 1977.

Получено 16.01.2006 г.

СЕМЕЙСТВО АДАПТИВНО-МОДУЛИРУЮЩИХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Анализ исследований

Подстройка к характеристикам обрабатываемых сигналов, в частности, их амплитуде, дисперсии и т.д. обуславливает противоречивые требования к значению шага квантования, который, с одной стороны, должен быть достаточно большим для использования всего динамического диапазона АЦП, а с другой, – малым, с целью уменьшения интенсивности шумов квантования. Тем не менее, подавляющее число современных серийных АЦП имеют фиксированный шаг квантования и представляют выходную величину в ИКМ-коде.

По сравнению с импульсно-кодовой модуляцией разностная ИКМ (РИКМ), в том числе её простейший вариант – дельта-модуляция (ДМ), обеспечивает более высокую помехоустойчивость и меньшую избыточность, улучшает информативность и достоверность в сферах измерений, управления, неразрушающего контроля и т.д. [1-4]. Так, согласно отношению «сигнал/шум» РИКМ превосходит ИКМ на 4ч11 Дб, причем наибольший выигрыш достигается при переходе от систем без предсказания к с предсказателем первого порядка, несколько меньший – при увеличении значения порядка предсказания от одного до 4ч5, после чего улучшение незначительно [1].

Для достижения оптимальных характеристик в изменяющихся условиях необходимо использовать адаптивные квантователи, которые позволяют достигнуть выигрыша порядка 10÷12 Дб по сравнению с неадаптивным случаем при том же числе уровней. Кроме того, адаптивный квантователь позволяет расширить динамический диапазон АЦП, а в случае адаптации по выходной последовательности слов не требуется передавать (хранить) дополнительную информацию о шаге квантования [1].

Постановка задачи

Цель данной работы состоит в создании на основе методологии быстрых дискретных преобразований [5] быстродействующих

© Пащенко В.А., Матвеева Н.А., 2006

аппаратно-алгоритмических средств для перехода от ИКМ-сигналов к кодам адаптивной РИКМ (АРИКМ) выбранной разрядности, а также для обратной их трансформации.

Основная часть. Используется линейный предсказатель первого порядка

$$x_i = [S_i - \alpha S_{i-1}]_k, (i=0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

где $(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N-1})$ – исходный ИКМ-сигнал, $(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ – его АРИКМ-аналог, N – натуральное число ($N \geq 3$), $[z]_k$ – оператор округления z до ближайшего сверху целого числа с последующим его усечением до k младших ($k=1, 2, \dots, n$) двоичных разрядов и их насыщением единицами. Предлагается придавать коэффициенту предсказания α следующие значения:

1. «Золотое сечение» $\varpi = (1 + \sqrt{5}) / 2 \approx 1,618\dots$ [6] на нарастающих участках огибающей ИКМ-сигнала, т.е. при $x_{i-1} \geq 0$; тогда $x_i \geq 0$, если последующая дискрета S_i больше предыдущей S_{i-1} , умноженной на ϖ , и $x_i \leq 0$, – в противном случае.
2. Обратное «золотому сечению» значение [6]:

$$\varpi^{-1} = \varpi - 1 \approx 0.618 \quad (2)$$

на убывающих участках огибающей ИКМ-сигнала, т.е. при $x_{i-1} \leq 0$; тогда $x_i \leq 0$, если одноименная дискрета S_i меньше предыдущей S_{i-1} , умноженной на ϖ^{-1} , и $x_i \geq 0$, – в альтернативном случае.

При несовпадении знаков у x_i и x_{i-1} , т.е. при переходе от нарастающего участка к ниспадающему или наоборот, модифицируется уравнение предсказания (1) путем замены ϖ на ϖ^{-1} при $x_{i-1} \geq 0$ и $x_i \leq 0$, а также замены ϖ^{-1} на ϖ при $x_{i-1} \leq 0$ и $x_i \geq 0$.

Заметим, что АРИКМ разрядности k представляет собой адаптивную дельта-модуляцию (АДМ) при $k=1$, а при $k=n$ оператор $[z]_n$ лишь округляет z до ближайшего сверху целого числа.

ПРИМЕР. В табл. 1 нумерованными и интерполированными дискретами представлен типичный пример бимодального ИКМ-сигнала, а также иллюстрируется процесс вычисления его АРИКМ-аналогов разрядности $k=8$ и $k=1$.

Таблица 1

Вычисление значений АРИКМ-кодов разрядности $k=8$, для исходного и линейно-интерполированного ИКМ-сигналов

N_0	S_i	$[S_i - \alpha S_{i-1}]_8$	$[S_i - \alpha S_{i-1}]_8$	S_i	$[S_i - \alpha S_{i-1}]_8$	$[S_i - \alpha S_{i-1}]_8$
0	1	$[1 - \varpi \cdot 0]_8 = 1$	1	1	$[1 - \varpi \cdot 0]_8 = 1$	1
1	2	$[2 - \varpi \cdot 1]_8 = 1$	1	1.5	$[1.5 - \varpi \cdot 1]_8 = -1$	-1
2	4	$[4 - \varpi \cdot 2]_8 = 1$	1	2	$[2 - \varpi \cdot 1.5]_8 = 2$	1
3	10	$[10 - \varpi \cdot 4]_8 = 4$	1	3	$[3 - \varpi \cdot 2]_8 = -1$	-1
4	27	$[27 - \varpi \cdot 10]_8 = 11$	1	4	$[4 - \varpi \cdot 3]_8 = 3$	1
5	70	$[70 - \varpi \cdot 27]_8 = 27$	1	7	$[7 - \varpi \cdot 4]_8 = 1$	1
6	178	$[178 - \varpi \cdot 70]_8 = 65$	1	10	$[10 - \varpi \cdot 7]_8 = -2$	-1
7	85	$[85 - \varpi \cdot 178]_8 = -204$	-1	18.5	$[18.5 - \varpi \cdot 10]_8 = 3$	1
8	30	$[30 - \varpi \cdot 85]_8 = -23$	-1	27	$[27 - \varpi \cdot 18.5]_8 = -3$	-1
9	24	$[24 - \varpi \cdot 30]_8 = 6$	1	48.5	$[48.5 - \varpi \cdot 27]_8 = 36$	1
10	80	$[80 - \varpi \cdot 24]_8 = -42$	-1	70	$[70 - \varpi \cdot 48.5]_8 = -9$	-1
11	192	$[192 - \varpi \cdot 80]_8 = 63$	1	124	$[124 - \varpi \cdot 70]_8 = 81$	1
12	88	$[88 - \varpi \cdot 192]_8 = -223$	-1	178	$[178 - \varpi \cdot 124]_8 = -23$	-1
13	36	$[36 - \varpi \cdot 88]_8 = -19$	-1	131.5	$[131.5 - \varpi \cdot 178]_8 = 28$	1
14	12	$[12 - \varpi \cdot 36]_8 = -11$	-1	5	$[5 - \varpi \cdot 131.5]_8 = -129$	-1
15	5	$[5 - \varpi \cdot 12]_8 = -3$	-1	57.5	$[57.5 - \varpi \cdot 85]_8 = 6$	1
16	2	$[2 - \varpi \cdot 5]_8 = -2$	-1	30	$[30 - \varpi \cdot 57.5]_8 = -64$	-1
				27	$[27 - \varpi \cdot 30]_8 = 10$	1
				24	$[24 - \varpi \cdot 27]_8 = -19$	-1
				52	$[52 - \varpi \cdot 24]_8 = 38$	1
				80	$[80 - \varpi \cdot 52]_8 = -3$	-1
				136	$[136 - \varpi \cdot 80]_8 = 87$	1
				192	$[192 - \varpi \cdot 136]_8 = -29$	-1
				140	$[140 - \varpi \cdot 192]_8 = 22$	1
				88	$[88 - \varpi \cdot 140]_8 = -139$	-1
				62	$[62 - \varpi \cdot 88]_8 = 8$	1
				36	$[36 - \varpi \cdot 62]_8 = -65$	-1
				24	$[24 - \varpi \cdot 36]_8 = 2$	1
				12	$[12 - \varpi \cdot 24]_8 = -27$	-1
				8.5	$[8.5 - \varpi \cdot 12]_8 = 2$	1
				5	$[5 - \varpi \cdot 8.5]_8 = -9$	-1
				3.5	$[3.5 - \varpi \cdot 5]_8 = -1$	-1
				2	$[2 - \varpi \cdot 3.5]_8 = -4$	-1

Начальный участок области большой положительной (отрицательной) крутизны порождает последовательность значений $'2^k-1'$ (значений $'-(2^k-1)'$) как, например, на интервале $0 \div 6$ (и интервале $12 \div 16$) при $k=1$. С уменьшением k возрастает длина этих последовательностей, т.е. перегрузка по крутизне проявляется рельефнее. Тем не ме-

нее, увеличение шага квантования согласно (1) позволяет отслеживать нарастание крутизны.

Области дробления (на интервале $8 \div 11$, табл. 1) соответствует строго чередующаяся последовательность из $+(2k-1)$ и $-(2k-1)$, когда шаг квантования быстро уменьшается и остается таковым, пока крутизна мала.

Поскольку минимальный шаг квантования ограничен разрешающей способностью используемого АЦП, то шум дробления можно существенно уменьшить. С другой стороны, максимальный шаг квантования с течением времени можно сделать большим, чем максимальная крутизна входного сигнала, что приведет к уменьшению шума перегрузки по крутизне.

Процесс преобразования ИМК-сигнала в АРИКМ-код $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1})$ можно представить посредством умножения вектора $(S_0, S_1, \dots, S_{N-1})$ на модифицированные матричные операторы:

$$Trst \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\omega & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\omega & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\omega & 1 \end{bmatrix} Trst \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\omega^{-1} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\omega^{-1} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega^{-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\omega^{-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

на участках с, соответственно, положительной и отрицательной крутизной, причем $Trst$ – операция усечения с насыщением ('truncation with saturation');

$$Trst \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\omega & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\omega^{-1} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\omega^{-1} & 1 \end{bmatrix} Trst \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\omega^{-1} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\omega & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega^{-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\omega & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

на участках дробления при нечетном числе строк и столбцов матрицы;

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{K-2} \\ x_{K-1} \\ x_K \\ x_{K+1} \\ x_{K+2} \\ \vdots \\ x_{W-2} \\ x_{W-1} \end{bmatrix} = Trst \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\varpi & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -\varpi & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\varpi^{-1} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\varpi & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -\varpi^{-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\varpi^{-1} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \vdots \\ S_{K-2} \\ S_{K-1} \\ S_K \\ S_{K+1} \\ S_{K+2} \\ \vdots \\ S_{W-2} \\ S_{W-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

на участке с перегибом крутизны ($K \approx W/2$).

Нижнетреугольный вид матриц типа (3) – (5) обеспечивает выполнение адаптивной модуляции в реальном масштабе времени согласно уравнению (1), причем как неизменному, так и преобразованному с помощью равенства (2):

$$x_i = [S_i - \varpi S_{i-1}]_k, \text{ если } x_{i-1} \geq 0 \quad (6)$$

$$x_i = [(S_i + S_{i-1}) - \varpi S_{i-1}]_k, \text{ если } x_{i-1} \leq 0, \quad (7)$$

т.е. с привлечением вычислений линейной сложности: умножения на $-\varpi$ и двух- или трехоперандного сложения в каждом такте.

Логическая схема устройства представлена на рис. 1. С его входов очередная дискрета S_i , представленная в двоичном коде, поступает на первую группу входов сумматора, а также на входы регистра 1, где хранится в течение следующего такта. Предыдущая дискрета S_{i-1} из регистра 1 поступает на первую группу входов матричного умножителя, помножающего на код $(-\varpi)$, а также на вторую группу входов сумматора, которая стробируется знаковым разрядом регистра 2, хранящего полученное в предыдущем такте слово АРИКМ-кода. Если знаковый разряд содержит '0' (положительное число), то сумма вычисляется согласно (6), а в противном случае, – с помощью (7). Логические схемы ИЛИ обеспечивают усечение m -разрядной суммы до k младших разрядов с их насыщением единицами, если полученная сумма ненулевая в разрядах, старше k -го.

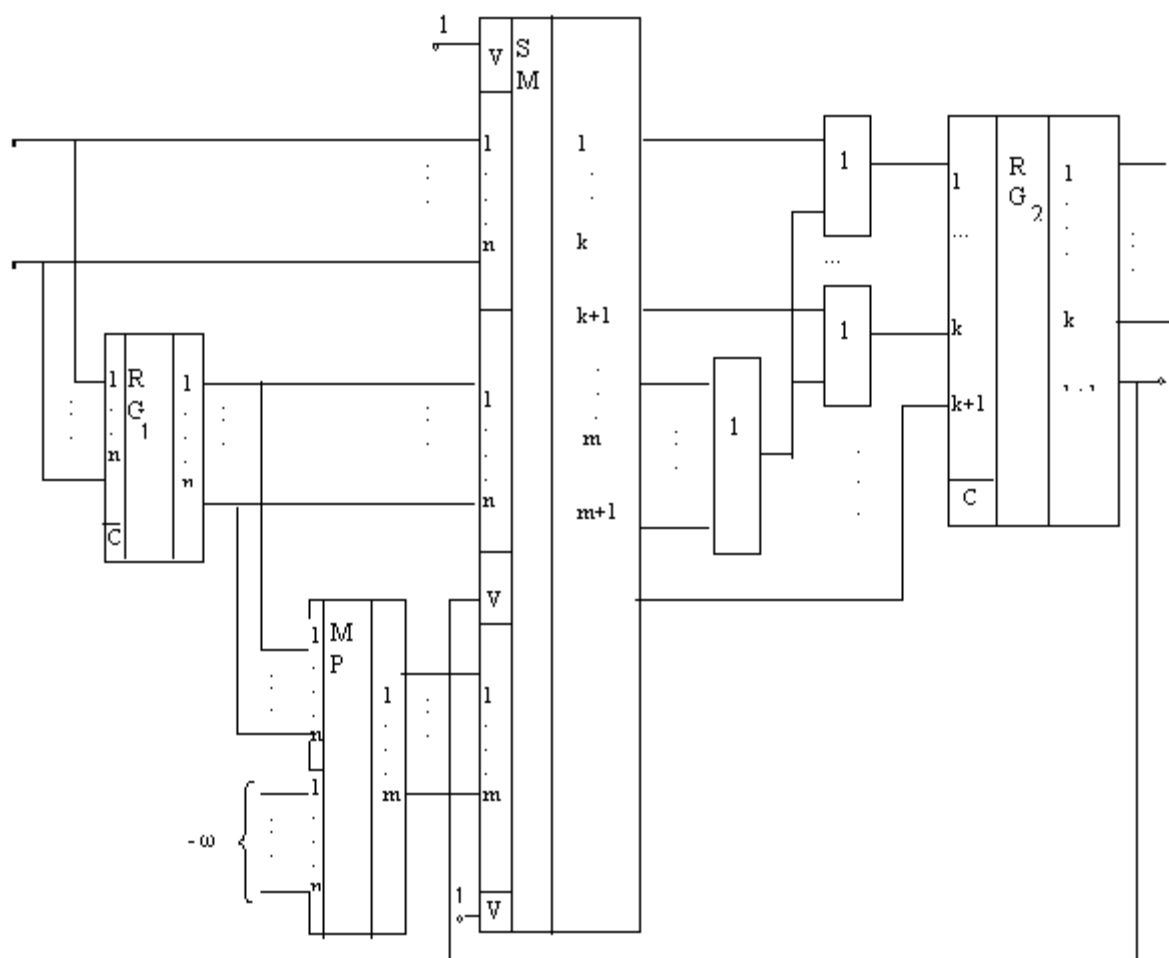


Рис.1 – Логическая схема преобразователя ИКМ-сигнала в АРИКМ-код разрядности k

Обратные АРИКМ-преобразования, обеспечивающие получение восстановленных ИКМ-сигналов $(\hat{S}_0, \hat{S}_1, \dots, \hat{S}_{N-1})$, задаются путем умножения кодового слова $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1})$ на матрицы, обратные (3) – (5), в частности:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega^2 & \omega & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \omega^{N-1} & \omega^{N-2} & \omega^{N-3} & \omega^{N-4} & \dots & \omega & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega^{-1} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega^{-2} & \omega^{-1} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \omega^{1-N} & \omega^{2-N} & \omega^{3-N} & \omega^{4-N} & \dots & \omega & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

для участков с положительной и отрицательной крутизной, соответственно;

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & \omega^{-1} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega & 1 & \omega & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \omega & 1 & \omega & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \omega^{-1} & 1 & \omega^{-1} & \dots & \omega^{-1} & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega^{-1} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & \omega & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \omega^{-1} & 1 & \omega^{-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \omega^{-1} & 0 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \omega & 1 & \omega & \dots & \omega & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

для участков с дроблением при нечетном числе строк и столбцов матрицы;

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \dots \\ S_{K-1} \\ S_K \\ S_{K+1} \\ S_{K+2} \\ \dots \\ S_{W-2} \\ S_{W-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\omega & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -\omega & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\omega^{-1} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -\omega & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -\omega^{-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\omega^{-1} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \dots \\ S_{K-1} \\ S_K \\ S_{K+1} \\ S_{K+2} \\ \dots \\ S_{W-2} \\ S_{W-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

для участков с перегибом крутизны (W - нечетное).

В случае произвольного слова АРИКМ-кода разрядности k , у которого $x_j \in \{-2^k + 1, \dots, -1, 1, \dots, 2^k - 1\}$ ($j=0, 1, \dots, N-1$), элементы матрицы обратного адаптивно-модулирующего преобразования таковы:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } i < j \\ 1, & \text{если } i = j, (i, j=0, 1, \dots, N-1) \\ \sum_{s=0}^{i-1} \text{sign}\{x_s\} - j, & \text{если } i > j \end{cases} \quad (11)$$

причем

$$\text{sign}\{x_s\} = \begin{cases} +1, & \text{если } x_s \geq 0 \\ -1, & \text{если } x_s < 0 \end{cases}.$$

Нижнетреугольный вид матриц обратного адаптивно-модулирующего преобразования с элементами, задаваемыми (11), обеспечивает восстановление ИКМ-сигнала, исходя из его АРИКМ-кода разрядности k в реальном масштабе времени согласно рекуррентным соотношениям:

$$\hat{S}_i = x_i + \varpi \cdot \hat{S}_{i-1}, \text{ если } x_{i-1} \geq 0 \text{ (} i=0, 1, \dots, N-1 \text{)} \quad (12)$$

$$\hat{S}_i = x_i + \varpi^{-1} \cdot \hat{S}_{i-1} = (x_i - \hat{S}_{i-1}) + \varpi \cdot \hat{S}_{i-1}, \text{ если } x_{i-1} < 0. \quad (13)$$

Следовательно, в каждом из N тактов используется умножение на ϖ и двух- или трехоперандное сложение, т.е. сложность вычислений – линейная.

В табл. 2 представлены результаты восстановления с помощью соотношений (12) и (13) сглаженного ИКМ-сигнала, приведенного в табл. 1, исходя из АРИКМ-кода разрядности $k=8$. Применение линейной интерполяции позволило уменьшить максимальную погрешность (относительно динамического диапазона АЦП) на порядок благодаря тому, что соседние кодовые слова x_i имеют чередующиеся знаки (прогнозируемые значения поочередно больше и меньше амплитуды ИКМ-сигнала).

Логическая схема преобразователя k -разрядного слова АРИКМ-кода в восстановленный ИКМ-сигнал представлена на рис. 2. В каждом такте с входов устройства на первую группу входов сумматора поступает очередное k -разрядное двоичное слово x_i . В триггере хранится знаковый разряд предыдущего слова x_{i-1} : если оно положительно (содержится логический ноль), то вычисление реализуется согласно (12), а в противном случае – посредством (13), когда через вторую группу входов, преобразуясь в дополнительный код, в сумматор поступает предыдущая восстановленная дискрета $\hat{S}_{i-1}$ из регистра. Эта дискрета также помножается матричным умножителем на константу $\varpi=(1,101001001\dots)_2$, после чего подается на третью группу входов сумматора, который и формирует дискрету $\hat{S}_i$, хранимую в регистре и присутствующую на выходах устройства в следующем такте.

Восстановление ИКМ-сигнала по 8-разрядному АРИКМ-аналогу

№	x_i	$\hat{S}_i = X_i + \alpha \hat{S}$	$\frac{S_i - \hat{S}_i}{256} 100, \%$	x_i	$\hat{S}_i = X_i + \alpha \hat{S}$	$\frac{S_i - \hat{S}_i}{256} 100, \%$
0	1	1	0	1	1	0
				-1	0,618	0,345
1	1	2,618	-0,241	2	2,382	-0,149
				-1	2,854	0,057
2	1	5,236	-0,483	3	4,764	-0,298
				1	8,708	-0,667
3	4	12,472	-0,966	-2	12,089	-0,816
				13	20,471	-0,770
4	11	31,179	-1,633	-3	30,122	-1,220
				32	50,616	-0,826
5	27	77,448	-2,909	-9	72,896	-1,131
				81	126,050	-0,801
6	65	190,311	-0,048	23	180,948	-1,152
				22	133,826	-0,909
7	-204	103,923	-7,392	-128	88,531	-1,380
				5	59,712	-0,864
8	-23	41,224	-0,044	-64	32,614	-1,021
				9	29,155	-0,842
9	6	31,477	-2,921	-20	27,173	-1,240
				38	54,793	-1,091
10	42	92,930	-5,051	-5	83,655	-1,428
				87	138,699	-1,054
11	63	213,360	-8,344	-29	195,415	-1,334
				22	142,767	-1,081
12	-223	122,216	-13,366	139	91,946	-1,561
				8	64,834	-1,115
13	-19	56,529	-8,019	-65	39,933	-1,536
				2	26,679	-1,046
14	-11	23,935	-4,662	-27	16,166	-1,627
				2	11,991	-1,364

Логические схемы (рис. 1 и рис. 2) для вычисления прямого и обратного адаптивно-модулирующих преобразований во многом идентичны друг другу, поэтому могут быть реализованы в виде единого программируемого устройства с режимами работы: кодирование и декодирование. Эти логические схемы отличаются близкими к единице значениями коэффициента использования оборудования, а также допускают микропрограммную реализацию специализированными процессорами ЦОС, архитектуре которых полностью адекватны.

ISSN 1562-9945

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов. – М.: Радио и связь, 1981. – 496 с.
2. Дельта-модуляция: Теория и применение/ Венедиктов М.Д. и др. – М.: Связь, 1976. – 271 с.
3. Стил Р. Принципы дельта-модуляции. – М.: Связь, 1979. – 368с.
4. Погрибной В. А. Дельта-модуляция в цифровой обработке сигналов. - М: Радио и связь, 1990. – 216с.
5. Дагман Э.Е., Кухарев Г.А. Быстрые дискретные ортогональные преобразования. – Новосибирск: Наука, 1983. – 256с.
6. Воробьев Н.Н. Числа Фибоначчи. – М.: Наука, 1978. – 142 с.

Получено 30.01.2006 г.

НОВЫЕ МОДЕЛИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВЕСОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ ИЗГИБАЕМЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение. Изгибаемые стержневые элементы, эксплуатируемые в технологических и рабочих средах различных производств, часто подвергаются коррозионному износу. Коррозия наносит большой ущерб экономике в результате безвозвратных потерь металла, преждевременного, нередко аварийного, выхода из строя элементов оборудования. Потери можно сократить, в том числе, за счет внедрения новейших разработок в области проектирования и расчета конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах.

Рассматриваемые в работе балочные конструкции, широко применяются в аппаратах на нефтеперерабатывающих заводах в качестве опор для внутренних контактных устройств. Вследствие химических реакций и высокой температуры внутри колонны постоянно присутствуют пары воды, серной и сернистой кислот. При таких условиях имеет место электрохимическая коррозия, когда скорость процесса зависит от механических напряжений в элементах конструкции.

Таким образом актуальность проблемы оптимизации балочных конструкций не вызывает сомнений. В последние годы ей уделяется значительное внимание; некоторые подходы к ее решению изложены в обзорах [1, 2].

Анализ известных математических моделей. Для решения проблемы снижения материалоемкости балочных опор предлагается постановка задачи весовой оптимизации корродирующей балки по критерию минимума объема в начальный момент времени при заданном сроке эксплуатации.

В случаях, когда конструкция работает в нейтральной среде, то есть в функции ограничений время не входит, то имеет место одноконтурная модель с обратной связью, изображенная на рисунке 1.

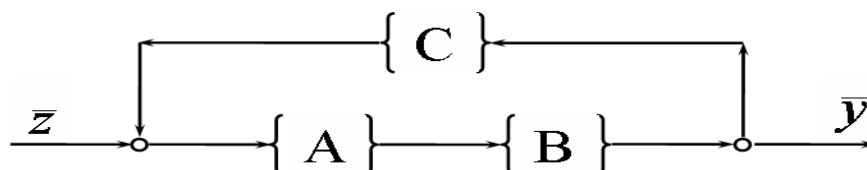


Рис. 1 – Одноконтурная модель

© Зеленцов Д.Г., Ускова Т.Ю., 2006

На рисунке приняты следующие обозначения: $\{A\}$ – модуль вычисления целевой функции; $\{B\}$ – модуль вычисления функции ограничений; $\{C\}$ – модуль решения задачи нелинейного программирования; $\bar{z}$ – вектор входных параметров, включающий в себя: $\bar{x}$ – вектор варьируемых параметров; $\bar{c}$ – вектор параметров конструкции; $\bar{w}$ – вектор параметров численных процедур; $\bar{y}$ – вектор выходных параметров (оптимальных параметров конструкции).

Эта же модель (далее – модель 1) может быть использована и при наличии слабоагрессивной среды, например, при атмосферной коррозии, математическая модель которой [3] имеет вид:

$$\frac{d\delta}{dt} = k\delta(b - \delta) \quad (1)$$

Но условия эксплуатации элементов креплений в колоннах таковы, что делают невозможным использование этой модели. В нашем случае имеет место сильноагрессивная среда, скорость коррозии превышает 1 мм/год. При этом механические напряжения интенсифицируют коррозионный процесс. Математическая модель коррозионного износа может быть представлена в виде:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \psi(\sigma(\delta)); \psi(0)=1; \delta|_{t=0}=0 \quad (2)$$

В качестве ограничений, обеспечивающих безотказную работу конструкции на протяжении всего срока эксплуатации, принимаются ограничения по прочности и жесткости. В виде задачи нелинейного математического программирования эта постановка может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} F = F(\bar{x}) \rightarrow \min \\ g_1 = [\sigma] - \frac{My^{max}}{I(\bar{x}, t^*)} \geq 0 \\ g_2 = [f] - \frac{ML^2}{EI(\bar{x}, t^*)} \geq 0 \\ g_3 = (x_i - x_i^-)(x_i^+ - x_i) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Влияние напряжения приводит к появлению второго (внутреннего) контура, и модель решения оптимизационной задачи становится двухконтурной (в дальнейшем – модель 2). В общем виде она изображена на рисунке 2. Здесь обозначения те же, что и на рисунке 1.

Дополнительный модуль $\{D\}$ – модуль пересчета геометрических параметров и вектор входных параметров $\bar{z}$ включает в себя еще и вектор параметров агрессивной среды $\bar{v}$.

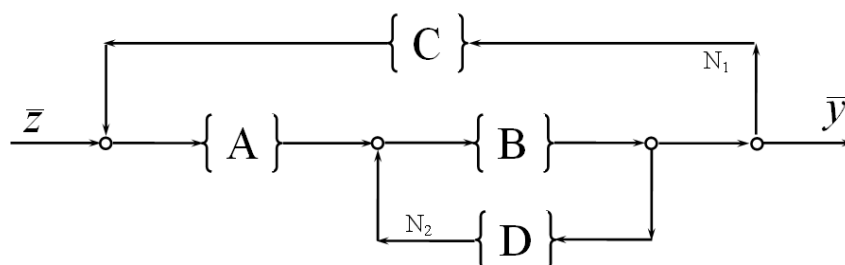


Рис. 2 – Двухконтурная модель

Данная модель неудобна по нескольким причинам. Прежде всего, она имеет низкую эффективность, особенно при оптимизации многоэлементных конструкций, когда вычисление функции ограничений предполагает численное решение задачи напряженно-деформированного состояния, и чувствительна к погрешностям, возникающим при вычислении функций ограничений.

В ряде случаев [4] возможен переход от нее к более удобной модели с последовательными одноконтурными связями, изображенной на рисунке 3 (модель 3). Реализация этой модели предполагает решение задачи оптимизации по критерию минимума массы в момент разрушения с последующим увеличением оптимальных параметров на величину, компенсирующую коррозионные потери.

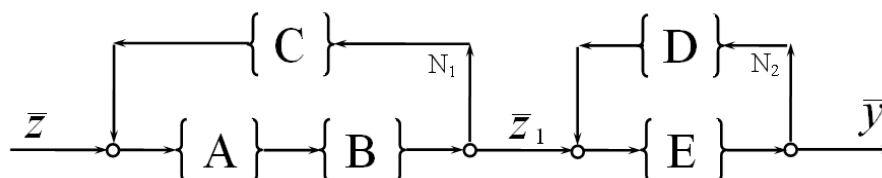


Рис. 3 – Модель с последовательными одноконтурными связями

Здесь $\bar{z}_1$ – вектор оптимальных параметров для нейтральной среды; $\{E\}$ – модуль пересчета оптимальных параметров.

Преимущества модели 3 заключаются в том, что в ней задача Коши решается только один раз, что, несомненно, положительно сказывается на ее точности и эффективности. Однако, непосредственное использование этой модели для весовой оптимизации корродирующих балок невозможно. Это подтверждает анализ известных работ, посвященных данной проблеме. В одной из них [5] были предложены оптимальные решения задач для корродирующей двутавровой балки,

полученные с использованием моделей 2 и 3 (двухконтурной и с последовательными одноконтурными связями). Существенное расхождение результатов объясняется, очевидно, игнорированием периметра сечения в модели 3, который неявно входит в систему ограничений в модели 2.

Таким образом, переход от модели 2 к модели 3 если и возможен, то только после ее существенной адаптации.

Адаптация модели с последовательными одноконтурными связями.

В [6] была сформулирована задача оптимизации по обобщенному критерию: минимума площади сечения и минимума его периметра. В этом случае слагаемое, содержащее периметр, может рассматриваться как штрафная функция. Таким образом, влияние периметра сечения учитывается не в функциях ограничений, а в целевой функции. Приведя значения площади и периметра сечения к безразмерному виду, обобщенную целевую функцию можно представить в виде:

$$G = n \frac{P - P^-}{P^+ - P^-} + (1 - n) \frac{F - F^-}{F^+ - F^-}. \quad (4)$$

Здесь n – весовой коэффициент, учитывающий влияние периметра сечения ($n \in [0; 1]$); P^- , P^+ , F^- , F^+ – соответственно наименьшее и наибольшее из значений периметра и площади, которые они могут принимать в заданной области значений варьируемых параметров.

Из анализа результатов, полученных для прямоугольных сечений и приведенных в [6], следует, что оптимальные проекты, полученные с помощью моделей 2 и 3, совпадают при правильном выборе коэффициента влияния периметра сечения. Таким образом, для профилей, сечение которых представимо совокупностью прямоугольных фрагментов, была установлена качественная и количественная зависимость оптимальных параметров сечения от его периметра.

На основании статистической обработки результатов численного эксперимента предлагается эмпирическая формула для выбора этого коэффициента:

$$n = 1 - \frac{b}{v_0 t + b}, \quad (v_0 t \geq 0); \quad b = b([\sigma]), \quad (5)$$

где b – константа, зависящая от величины предельного напряжения.

Целью дальнейших исследований является доказательство возможности применения адаптированной модели к оптимизации размеров сечений произвольной формы.

Постановка задачи. Для доказательства возможности применимости адаптированной модели для различных профилей проведен численный эксперимент для балки произвольной формы сечения. Принимаются следующие требования к форме сечения: оно должно иметь две оси симметрии и кривая, ограничивающая его, является гладкой. Предложено сечение, состоящее из двух фрагментов (рисунок 4).

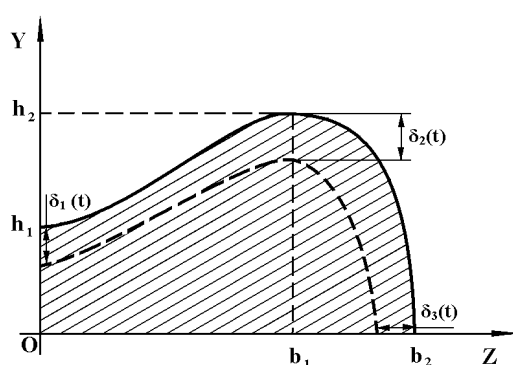


Рис. 4 – Сечение балки, состоящее из двух фрагментов

Постановка задачи предполагает возможность достижения в процессе решения задачи варьируемыми параметрами предельных значений и вырождения вследствие этого сечения в одно из приведенных на рисунке 5.

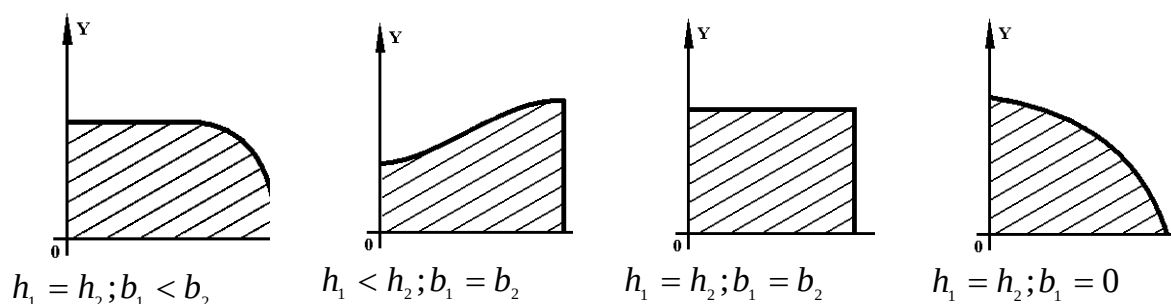


Рис. 5 – Частные случаи формы сечения

В качестве варьируемых параметров для модели 2 принимаются координаты характерных точек контура в начальный момент времени, которые изменяют свои значения в процессе эксплуатации.

$$\bar{x} = (b_1, b_2, h_1, h_2) \quad (6)$$

$$\begin{cases} h_1(t) = h_1 - \delta_1(t) \\ h_2(t) = h_2 - \delta_2(t) \\ b_2(t) = b_2 - \delta_3(t) \end{cases} \quad (7)$$

На основании анализа условий непрерывности и гладкости:

$$\begin{aligned} y|_{z=0} &= h_1 & y|_{z=b_1} &= h_2 & y|_{z=b_2} &= 0 \\ \frac{dy}{dx}|_{z=0} &= 0 & \frac{dy}{dx}|_{z=b_1} &= 0 & \frac{dy}{dx}|_{z=b_2} &= \infty \end{aligned} \quad (8)$$

выбираются функции, аппроксимирующие форму сечения:

$$z \in [0; b_1] \quad f(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 \quad (9)$$

$$z \in [b_1; b_2] \quad f(z) = h_2 \sqrt{1 - \frac{(z - b_1)^2}{(b_2 - b_1)^2}} \quad (10)$$

Вычисление этих коэффициентов функции (9) производится на каждом шаге решения оптимизационной задачи путем численного решения системы:

$$\begin{cases} a_0(\bar{x}, t) = h_1(t) \\ a_1(\bar{x}, t) = 0 \\ a_2(\bar{x}, t) = \frac{3[h_1(t) - h_2(t)]}{b_1^2(t)} \\ a_3(\bar{x}, t) = -\frac{2[h_1(t) - h_2(t)]}{b_1^3(t)} \end{cases} \quad (11)$$

Постановка оптимизационной задачи для модели 2 примет вид:

$$\begin{cases} F(\bar{x})|_{t=0} = 4 \int_0^{b_1} (a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3) dz + \pi(b_2 - b_1)h_2 \rightarrow \min \\ g_1: [\sigma] - \frac{My^{\max}}{I(\bar{x}, t)} b_2(t) \geq 0 \\ g_2: (x_i^+ - x_i)(x_i - x_i^-) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Для модели 3 постановка задачи имеет вид (13):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_0 = n \frac{P(\bar{x}^*) - P^-}{P^+ - P^-} + (1-n) \frac{F(\bar{x}^*) - F^-}{F^+ - F^-} \rightarrow \min \\ g_1 = [\sigma] - \frac{My^{\max}}{I(\bar{x}^*)} \geq 0 \\ g_2 : (x_i^+ - x_i)(x_i - x_i^-) \geq 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

Предполагается, что скорость коррозии направлена по нормали к поверхности, а модель коррозионного износа имеет вид [7]:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0(1 + k\sigma), \quad (14)$$

где k – коэффициент влияния напряжения на скорость коррозии.

Система дифференциальных уравнений, описывающая коррозионный процесс, решается на каждом шаге поиска оптимального проекта по алгоритму, описанному в [6].

Анализ результатов. Численный эксперимент проводился для балки нагруженной моментом $M = 25000$ кг×см и подверженной коррозионному износу, при значениях параметров: $v_0 = 0,1$ см/год; $k = 0,003$ МПа⁻¹. Область изменения варьируемых параметров: $0,1 \leq h_1^* \leq 2,0$ см; $0,1 \leq h_2^* \leq 4,0$ см; $0,1 \leq b_1^* \leq 6,0$ см; $0,1 \leq b_2^* \leq 7,0$ см. В функции ограничений принималось значение предельного напряжения: $[\sigma] \leq 240$ МПа. Заданная долговечность рассматривалась в пределах: $0,0 \leq t^* \leq 6,0$ лет.

Задача решалась с использованием модели 2 и адаптированной модели 3. Небольшое количество варьируемых параметров позволило применить метод перебора и получить значение глобального минимума целевых функций.

Некоторые результаты численного эксперимента представлены на рисунке 6. Здесь показана поверхность, представляющая собой площадь сечения балки, как функция двух переменных: параметра n и произведения $v_0 t$.

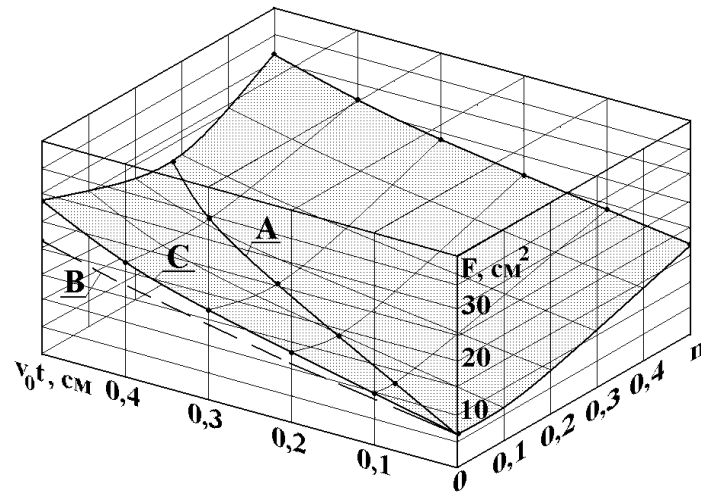


Рис. 6 – Зависимость площади поперечного сечения от параметров n и v_0t

Линия А проходит через точки минимума функции площади сечения балки $F = F(n)$, найденные для каждого значения параметра v_0t . С его увеличением точки минимума функции смещаются в сторону увеличения параметра n . Другими словами, влияние периметра сечения увеличивается при увеличении заданного срока эксплуатации конструкции или степени агрессивности среды. Кривая С соответствует решению задачи, полученному для модели 3 и показывает зависимость $F = F(v_0t)$ при игнорировании периметра. Кривая В представляет собой проекцию линии А на плоскость Fv_0t и соответствует решению задачи для адаптированной модели 3. Это решение практически совпадает с решением задачи для модели 2.

Результаты численного эксперимента представлены на рисунке 7.

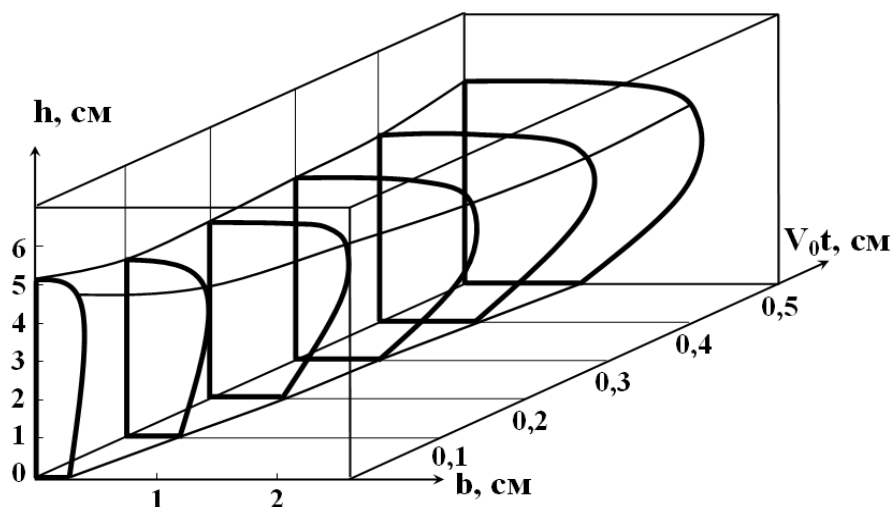


Рис. 7 – Оптимальные сечения балки для различных значений долговечности

В таблице 1 приведены численные результаты решения задачи с использованием модели 2. Значения оптимальных параметров, полученных с помощью адаптированной модели 3, приведены в скобках. Расхождения результатов не превышают 2 %.

Таблица 1 – Численные значения оптимальных размеров сечений

$v_0 t$, см	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
F , см ²	8,904 (8,923)	11,554 (11,608)	13,774 (13,780)	16,314 (16,286)	18,650 (18,631)	21,185 (21,207)
h_1 , см	4,230 (4,243)	3,758 (3,734)	3,640 (3,612)	3,876 (3,860)	3,758 (3,817)	3,640 (3,598)
h_2 , см	4,792 (4,914)	4,240 (4,297)	4,102 (4,115)	4,378 (4,403)	4,378 (4,341)	4,654 (4,592)
b_1 , см	0,366 (0,361)	0,480 (0,476)	0,556 (0,565)	0,670 (0,664)	0,784 (0,793)	0,860 (0,849)
b_2 , см	0,568 (0,559)	0,880 (0,869)	1,114 (1,107)	1,192 (1,207)	1,348 (1,351)	1,426 (1,448)

Выводы. На основании результатов численного эксперимента установлено, что получить оптимальные размеры сечений корродирующей балки непосредственно исходя из оптимального проекта для нейтральной среды (то есть при использовании модели 3) не удастся. Использование этой модели для получения оптимального решения возможно лишь после ее адаптации, заключающейся в изменении критерия оптимальности. Показана возможность использования адаптированной модели для произвольной формы сечения.

Определена степень влияния периметра сечения на его оптимальные параметры, а также качественные и количественные параметры данного влияния.

Таким образом, предложена новая модель оптимизации корродирующих балок при активных ограничениях по прочности. Она предполагает решение задачи оптимизации для нейтральной среды по обобщенному критерию для определенного коэффициента влияния периметра, и последующим увеличением оптимальных параметров на величину, компенсирующую коррозию.

Степень эффективности предложенной модели по сравнению с моделью 2 определяется формулой $\eta = \frac{N_1 \cdot N_2}{N_1 + N_2}$, где N_1 - количество

итераций при решении задачи нелинейного математического программирования; N_2 – количество итераций при численном решении задачи Коши.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Петров В.В. Прогнозирование работоспособности элементов конструкций, подвергающихся коррозионному износу (обзор). // Физико-химическая механика материалов. – 1991. – № 2. – С. 7 – 15.
2. Зеленцов Д.Г., Филатов Г.В. Обзор исследований по применению методов нелинейного математического программирования к оптимальному проектированию конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. // Вопросы химии и химической технологии. – 2002. – № 4. – С. 108 – 115.
3. Овчинников И.Г., Петров В.В. Определение долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. // Строит. механика и расчет сооружений. – 1982. – № 2. – С. 8 – 10.
4. Zelentsov D.G., Pochtman Yu.M. The supporting power and the optimal design of the thin-walled constructions, which are subjected to influence of the aggressive mediums. // ICF-8. Fracture mechanics: Successes and problems. Collection of Abstracts – Lvov, 1993. – Part. 1. – P. 291 - 292.
5. Зеленцов Д.Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.
6. Зеленцов Д.Г., Ускова Т.Ю. Исследование влияния периметра на оптимальные параметры сечений корродирующих изгибаемых стержневых элементов. // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – № 6. – С. 119 – 122.
7. Долинский В.М. Расчет нагруженных труб, подверженных коррозии // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1967. - № 2. – С. 9 – 10.

Получено 14.02.2005 г.

СТИСНЕННЯ РАСТРОВИХ ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ОБРАЗІВ ВІДМІННОСТЕЙ

Постановка проблеми. Сучасні системи дистанційного збору і обробки даних, як правило, отримують інформацію про об'єкти дослідження у вигляді їх растрових зображень, сформованих проекційними засобами. Це, як правило, напівтонові, мультиспектральні фотографіметричні зображення. Вони характеризуються значними об'ємами, що ускладнює їх передачу і збереження. Між тим, ці зображення також відзначаються значною збитковістю, яка дає можливість ефективно застосовувати процедури стиснення. Сучасні алгоритми стиснення зображень, як правило, мають універсальний характер і орієнтовані на оптимізацію критеріїв, що характеризують якість зорового сприйняття, не враховуючи особливостей зображень зазначеного класу [1]. Тому проблемою лишається вибір і адаптація алгоритмів стиснення відеоданих, поданих як растрові напівтонові або мультиспектральні фотографіметричні зображення.

Аналіз останніх досліджень. Існуючі алгоритми стиснення відеоінформації у вигляді растрових зображень можуть класифікуватися за багатьма ознаками, серед яких — ступінь стиснення, симетричність, математичні методи, покладені в основу алгоритму, клас зображень, для яких оптимізований алгоритм, тощо. Однією з основних характеристик алгоритму є наявність втрат при застосуванні процедури стиснення [2]. Серед алгоритмів без втрат широке застосування знайшли RLE (Run Length Encoding) — алгоритм групового кодування за рахунок ланцюжків однакових байтів, LWZ (Lempel, Ziv, Welch) — стиснення за рахунок ланцюжків байт, що повторюються, CCITT Group 3 — заміна послідовностей однакових бітів їх кількостями з подальшим кодуванням за Хафманом із фіксованою таблицею, JBIG (Joint Bi-level Experts Group) — стиснення шляхом виділення бітових площин [3] та Lossless JPEG (Joint Photographic Expert Group) — із застосуванням дискретного косинусного перетворення та кодування за Хафманом. Недоліком усіх зазначених алгоритмів є невисокий ступінь стиснення (в середньому 1.5 – 5 разів).

© Реута А.В., 2006

Значно ефективніші в цьому плані алгоритми стиснення з втратами, в яких більш-менш враховується когерентність областей зо-

браження — їх кольорова та/або структурна подібність. Такими є алгоритми JPEG, фрактальна архівація, в якій зображення подається коефіцієнтами системи ітерованих функцій (IFS — Iterated Function System) та рекурсивний (хвильовий) алгоритм, на основі вейвлет-перетворення [4]. Зазначені алгоритми дозволяють досягти в середньому стиснення у 10 – 200 разів, що значно перевищує цей показник для алгоритмів без втрат, але не забезпечують збереження якості зображення та можуть відзначаються значною асиметричністю (до 10000 для фрактального методу).

Розвиток сучасних методів стиснення зображень характеризується застосуванням в рамках одного алгоритму різних підходів в поданні (кодуванні) вихідного зображення, які максимально враховують його структурі і кольорові властивості. Прикладом такого алгоритму є JPEG 2000, в якому одночасно застосовується дискретне вейвлет-перетворення, арифметичне стиснення та управління якістю окремих областей зображення. Від дозволяє виконувати стиснення як з втратами, так і без них. Даний алгоритм є в значній мірі універсальним і не враховує такі особливості проєкційних зображень автоматизованих (зокрема, фотограмметричних) систем як мультиспектральність, нерівномірне квантування, надаючи, між тим, засоби, що для таких зображень є непотрібними (наприклад, прозорість).

В роботі [5] запропонована методика подання таких зображень у вигляді послідовності бінарних образів різного рівня декомпозиції (апроксимуючих компонент) і напівтонового образу (деталізуючої компоненти), на основі якої розв'язуються задачі їх аналізу і ідентифікації, а також можуть бути побудовані ефективні процедури стиснення. Однак, значна неоднорідність образів у деяких випадках не дає можливості досягти високих коефіцієнтів стиснення.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Слід вдосконалити спосіб подання растрових проєкційних зображень, запропонований в [5], який би забезпечував більшу однорідність образів, що подають розподіл яскравості. А також враховував би особливості їх формоутворення в автоматизованих системах дистанційного збору інформації.

Основна частина

В даній роботі пропонується вдосконалення схеми побудови подання растрових фотограмметричних зображень на основі бінарних

образів, запропонованої в [5]. Вдосконалення стосується заміни бінарних образів, що відповідають певним рівням яскравості вихідного зображення, образами, які подають відмінності між суміжними рівнями яскравості. В останньому випадку неоднорідність образів значно менша, що веде до збільшення коефіцієнта стиснення результуючого подання.

Вихідне растрове зображення подається матрицею яскравості $F = \|f_{ij}\|_{n \times m}$ розміром $n \times m$, де n і m — кількість пікселів у растрі по вертикалі і горизонталі, відповідно. (Далі скрізь вважається, що індекси елементів матриць приймають значення: $i = \overline{1, n}$ та $j = \overline{1, m}$.) Кожний елемент матриці F має значення яскравості відповідного пікселя зображення, яке лежить в діапазоні від 0 до $N - 1$, де N — кількість рівнів яскравості зображення (типове значення $N = 256$). Далі виконується перехід від матриці F до множини $\mathbf{B} = \{B^{(1)}, B^{(2)}, \dots, B^{(N)}\}$ бінарних образів, які формуються на основі виразу:

$$B^{(k)} = \|b_{ij}^{(k)}\|_{n \times m}, \quad b_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, & f_{ij} \geq k; \\ 0, & f_{ij} < k. \end{cases} \quad k = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Кожний бінарний образ має значну неоднорідність, яка є перешкодою для підвищення коефіцієнта його стиснення. Тому пропонується для подання зображення використовувати не самі бінарні образи, а образи відмінностей:

$$D^{(k)} = B^{(k)} \oplus B^{(k+1)}, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad (2)$$

що формуються наступним чином:

$$D^{(k)} = \|d_{ij}^{(k)}\|_{n \times m}, \quad d_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, & b_{ij}^{(k)} \neq b_{ij}^{(k+1)}; \\ 0, & b_{ij}^{(k)} = b_{ij}^{(k+1)}, \end{cases} \quad k = \overline{1, N-1}. \quad (3)$$

Саме зображення в цьому випадку подається змішаним набором образів $\mathbf{H} = \{B^{(1)}, D^{(1)}, D^{(2)}, \dots, D^{(N-1)}\}$. Кількість образів залишається незмінною, але між образами набору $\mathbf{H}$ спостерігається значно більша однорідність, ніж між образами набору $\mathbf{B}$. Крім того, при здійсненні стиснення із втратами, пропуск образу $D^{(k)}$ в наборі $\mathbf{H}$ призводить до

значно меншого погіршення якості зображення, ніж при знехтуванні образом $B^{(k)}$ в наборі $\mathbf{B}$.

Відновлення зображення на основі образів набору $\mathbf{H}$ здійснюється наступною схемою. Спочатку відновлюються бінарні образи $B^{(k)}$:

$$B^{(1)}, B^{(2)} = B^{(1)} + D^{(1)}, B^{(3)} = B^{(2)} + D^{(2)}, \dots B^{(k)} = B^{(k-1)} + D^{(k-1)}, \quad (4)$$

а тоді саме вихідне зображення:

$$F = \sum_{k=1}^N k \cdot B^{(k)}. \quad (5)$$

Для виконання стиснення образів набору $\mathbf{H}$ також можна використовувати схеми, запропоновані в [5], але при цьому значення коефіцієнта стиснення збільшується майже на 12%.

Як приклад розглянемо напівтонове фотограмметричне зображення розміром 400×400 пікселів, яке має 256 рівнів яскравості (рис. 1а). Бінарний образ цього зображення, що відповідає рівню яскравості 150 поданий на рис. 1б, а на рис. 1в — образ відмінності, на якому виділені піксели, що змінюють своє значення при переході до бінарного образу наступного рівня. Загальна кількість виділених пікселів на рис. 1в дорівнює 1089, що становить 0,68% від загальної кількості пікселів.

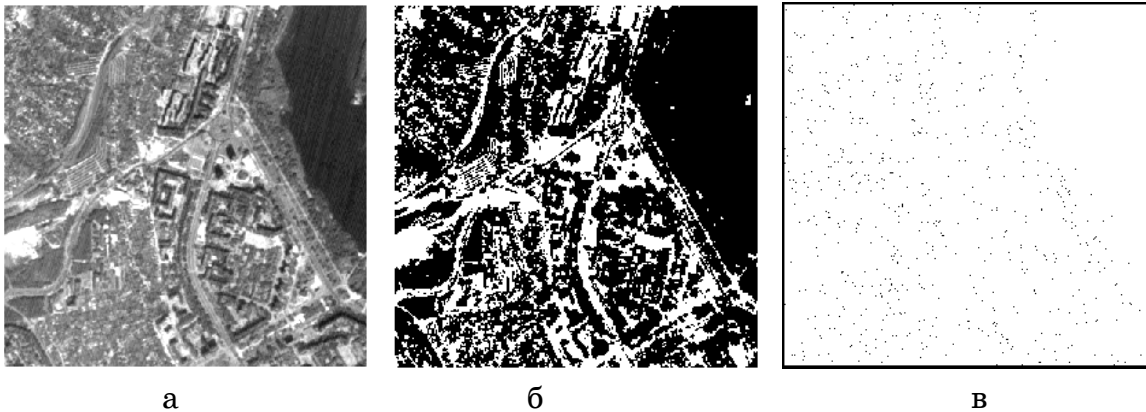


Рисунок 1 – Вихідне фотограмметричне зображення (а), його бінарний образ (б), що відповідає рівню яскравості 150, та образ відмінностей (в) для рівня 151

На рис. 2 показаний графік зміни кількості відмінних пікселів між суміжними бінарними образами зображення, поданого на рис. 1а.

Максимальний розбіг між суміжними образами складає 2244 піксели (образи рівнів яскравості 120 і 121), що при загальній кількості пікселів у зображенні 160000 становить 1,4%. Таким чином, образи відмінностей мають неоднорідність близько 1%.

Крім того, на рис. 2 видно, що розподіл кількості відмінних пікселів має декілька окремих піків. Це означає, що між певними образами відмінностей є значне розходження. В той же час, переважна більшість образів має розходження не більше ніж 1000 пікселів або 0,63%, що при здійсненні стиснення із втратами дає можливість вилучити з результуючого набору значну кількість образів, які з визначеною точністю збігаються із суміжними. При цьому кількість суттєво відмінних образів складає близько 4% від їх загальної кількості.

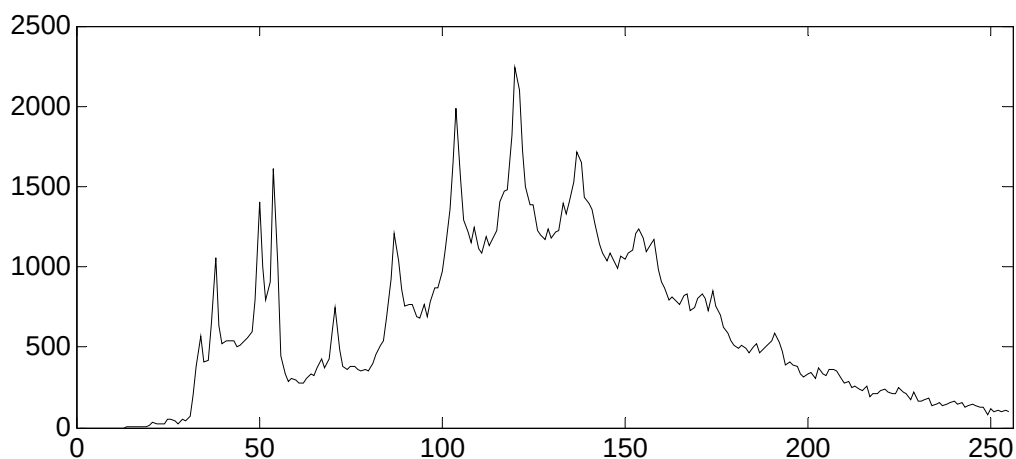


Рисунок 2 – Зміна кількості відмінних пікселів між бінарними образами в залежності від рівня яскравості

Слід також додати, що така ситуація є типовою для фотограмметричних зображень, які подають елементи земної поверхні без різких змін висоти рельєфу.

Висновки та перспективи подальших досліджень

На базі запропонованого підходу було розроблено програмний модуль-компресор фотограмметричних напівтонових зображень, який при стисненні без втрат дозволив отримувати графічні файли розміром на 23% менші за файли формату GIF (у порівнянні із форматом JPEG стиснення було гірше на 8%).

Подальшими напрямками розвитку алгоритму є дослідження можливостей внесення втрат на основі аналізу зміни образів відмін-

ностей, а також його розширення на обробку мультиспектральних зображень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Яншин В. В. Анализ и обработка изображений (принципы и алгоритмы). — М.: Машиностроение, 1995. — 336 с.
2. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. — 384 с.
3. Progressive Bi-level Image Compression, Revision 4.1 // ISO/IEC JTC1/SC2/WG9, CD 11544, September 16, 1991.
4. J. H. Kasner, M. W. Marcellin. Adaptive wavelet coding of images. Proc. IEEE Int. Conf. Image Proc. (ICIP), vol. 3, (Austin, TX), pp. 358 – 362, November 1994.
5. Реута О. В. Аналіз та обробка растрових зображень на основі їх бінарних образів // Современные проблемы геометрического моделирования: Сборник трудов Украина-российской научно-практической конференции. Спец. выпуск. — Харьков, 2005. — С. 318 – 323.

Получено 30.01.2006 г.

УДК 621-000

Е.А. Джур, А.Е. Проволоцкий, А.Г. Фесенко, И.И. Бондаренко,
О.В. Бондаренко

ПОИСК И РАЗРЕШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОТИВОРЕЧИЙ КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Наиболее общей целью разработки интегрированной технологии является создание конкурентоспособной продукции [1-3]. Конкурентоспособность в значительной мере определяется тремя факторами: качеством, сроками создания продукции и величиной затрат на ее изготовление и реализацию. Приоритет того или иного фактора зависит от конкретных рыночных и производственных условий.

В работе [1] выделяются следующие направления создания интегрированных технологий:

генеративные методы изготовления;
усовершенствованные традиционные методы изготовления;
комбинированные методы.

В работе [2] на основании литературных данных приведены такие подходы к определению понятия «интегрированная технология»:

использование CAD-CAM-CAE – систем для поддержки разработки всего жизненного цикла изделия или как минимум всего цикла его разработки и производства;

комбинированные методы, сочетающие в себе различные физические и химические эффекты;

«интеграция технологий это наука о решении задачи или разработке проекта в контексте всего предприятия и повышении эффективности путем реализации полезной взаимосвязи полезных его компонентов» [4].

При анализе этих направлений явно замечен уклон в сторону формообразования деталей и получения заданных свойств конструкционных материалов, а также в сторону изменения формы представления данных о форме, размерах детали и свойствах материала. В определении, данном в работе [4], указывается на необходимость «оптимального взаимодействия» всех структурных составляющих предприятия, но не детализируется в каких формах должно происходить это взаимодействие. В работе [2] на основании анализа структуры

технологического решения и его взаимосвязи с управленческим, конструкторским и организационным выделены направления разработки интегрированных технологий:

- интеграция конструкторских и технологических решений;
- интеграция основных составляющих технологических решений;
- интеграция основных и вспомогательных технологических решений;
- интеграция управленческих с конструкторскими, технологическими и организационными;
- интеграция технологических и организационных решений.

Таким образом, при достаточно четком выделении отдельных направлений разработки интегрированных технологий и наличии определенных практических результатов, отсутствует общий методологический подход к их разработке, что серьезно осложняет и сдерживает распространение имеющегося опыта для повышения эффективности деятельности отечественных предприятий. Целью данной работы является разработка такого подхода и оценка его влияния на использование интегрированных технологий в деятельности промышленных предприятий, научных и проектно-конструкторских организаций.

Сам термин «интеграция» означает, что между интегрируемыми решениями, точнее между факторами, влияющими на их принятие, имеется определенное несоответствие, которое выражается в следующем противоречии – положительный эффект, достигнутый за счет принятия и реализации одного решения, уменьшается либо сводится на нет неэффективностью других. Для создания работоспособного, тем более конкурентоспособного изделия, необходимо либо сгладить имеющиеся противоречия до приемлемых значений либо разрешить их. Традиционные конвенциональные технологии построены именно на сглаживании противоречий, чего в современных условиях уже недостаточно. Следовательно, интегрированная технология должна разрешать противоречие.

Таким образом, интегрированная технология – это технология, разрешающая противоречия между факторами, влияющими на принятие управленческих, конструкторских, технологических и организационных решений в процессе создания продукции.

В большинстве случаев такие противоречия являются техническими, потому что преградой на пути реализации управленческих и

организационных решений, как правило, оказывается техническая и технологическая неподготовленность предприятия к их выполнению. Методика же выявления и разрешения технических противоречий наиболее полно разработана в рамках теории решения изобретательских задач [5]. Следовательно, разработка интегрированной технологии может быть как инженерным, так и изобретательским решением.

Отдельного рассмотрения заслуживают ситуации, когда устаревшие подходы к принятию управленческих и организационных решений препятствуют принятию и реализации эффективных конструкторских и технологических решений. Имеющиеся в этом случае противоречия уже не являются техническими, и их разрешение зависит от эффективности системы управления предприятием, соответствующей достигнутому уровню развития науки, техники и технологии. Отсутствие такой системы управления приводит к снижению конкурентоспособности продукции предприятия и, в наиболее неблагоприятном для него случае, уходу с рынка. Так как интегрированная технология в любом случае это инновация, то на рынке остаются наиболее открытые для проведения и внедрения новых разработок предприятия, способствующие научно-техническому прогрессу, невозможному в настоящее время без всестороннего развития человека как личности и гуманизации общественного устройства. Следовательно, разработка и внедрение интегрированных технологий способствует социальному прогрессу и организации социотехнического производства.

В работе [1] отмечено, что «интегрирующая идея, разработки и реализации интегрированной технологии становятся возможными тогда, когда в каждой из интегрируемых областей науки, техники, технологии, материаловедения и т.д.. достигнут новый необходимый уровень развития», то есть разработка интегрированной технологии является результатом научно-технического прогресса. Такой подход имеет много общего с предложенным в работе [5], в которой научно-технический прогресс предстает в виде последовательности, приведенной на рисунке 1.

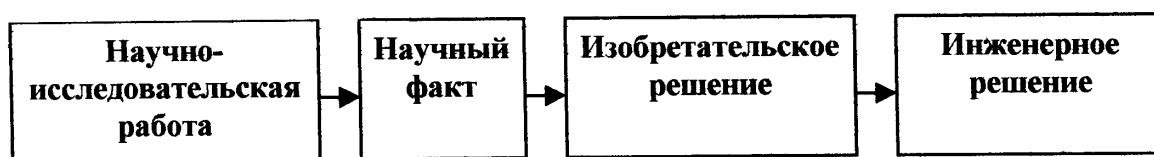


Рисунок 1 – Структура научно-технического прогресса

Следует отметить, что изобретательское и инженерное решения далеко не всегда следуют за научной разработкой на уровне установленного факта. Данное утверждение подтверждается тем, что практическое использование нового изделия, технологии начинается значительно раньше, чем эффекты, на основании которых разработано это изделие либо технология, будут достоверно изучены и получают полное объяснение с научной точки зрения. Кривые жизненного цикла изделия, показывающие соотношение «изученности» эффектов, на основании которых разработано изделие либо технология, с масштабами использования, приведены на рисунке 2 [5].

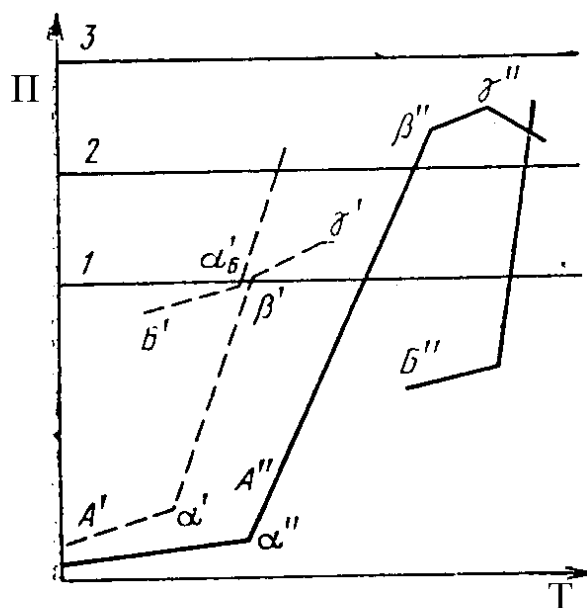


Рисунок 2 – Теоретическая и реальная кривые жизненного цикла технической системы (изделия или технологии)

На рисунке: 1 – уровень, до которого целесообразно быстрое развитие технической системы А, 2 – уровень, до которого система А может интенсивно развиваться при условии причинения вреда внешней среде либо при каких-либо благоприятных обстоятельствах, 3 – физический предел развития системы А, А', А'' – теоретическая и ре-

альная кривые жизненного цикла системы А, Б', Б'' – теоретическая и реальная кривые жизненного цикла системы Б, α' , α'' – соответственно теоретическая и реальная точки перехода к широкому использованию технической системы А, $\alpha_{Б'}$ – теоретическая точка начала широкого использования системы Б, β' , β'' – соответственно теоретическая и реальная точки окончания интенсивного развития системы А, γ' , γ'' – соответственно теоретическая и реальная точки начала деградации системы А, и ее замены системой Б, либо перехода системы А в стабильное состояние с сохранением достигнутых характеристик на длительное время.

Не вдаваясь подробно в описание приведенных на рисунке кривых, необходимо отметить, что широкое использование изделия или технологии начинается на более низком техническом уровне, чем следует из теоретической кривой – это как раз и указывает на отсутствие достаточно полного, научно обоснованного представления об эффектах, действующих в рассматриваемой системе.

Для современной техники характерно, что изобретательские и инженерные решения могут приниматься на основании гипотезы, в том числе и с целью ее проверки. С учетом этого целесообразно представить схему научно-технического прогресса так, как это показано на рисунке 3.

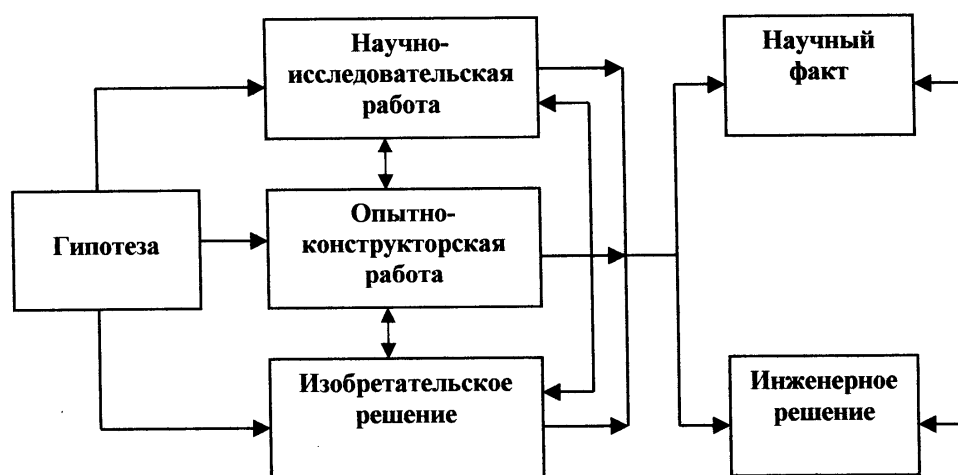


Рисунок 3 – Структура научно-технического прогресса при работе в условиях неполной изученности эффектов, на которых основаны принимаемые изобретательские и инженерные решения

Однако даже если принятые изобретательские или инженерные решения приносят желаемый эффект далеко не сразу и не всегда удастся установить, благодаря чему этот эффект получен. Это обусловлено большим количеством факторов, влияющих на работоспособность технических систем, их зачастую одновременным и разнонаправленным воздействием. В этом случае, даже после принятия инженерного решения, требуется интенсивная научная обработка получаемых результатов и оценка степени влияния каждого из известных факторов на работоспособность той или иной технической системы.

На рисунке 4 показаны направления разработки интегрированных технологий и тот вклад, который каждое из этих направлений вносит в достижение конечной цели деятельности предприятия, то есть в производство и реализацию конкурентоспособной продукции.

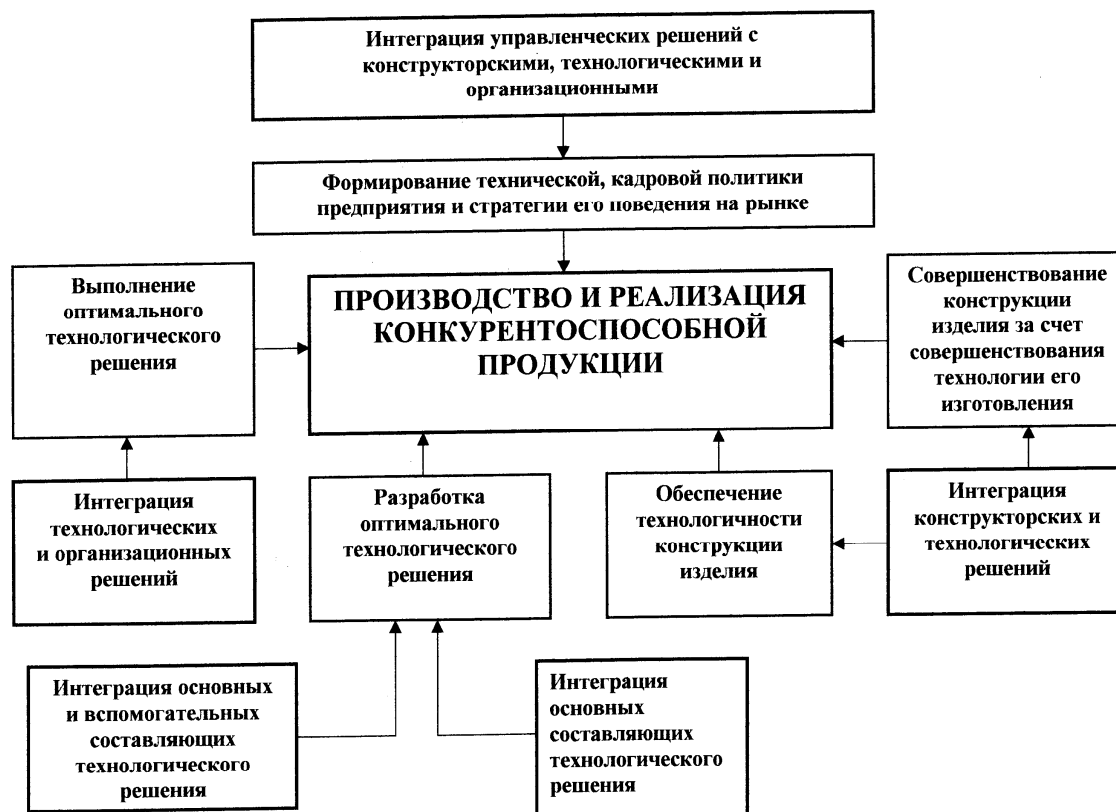


Рисунок 4 – Направления разработки интегрированных технологий и их вклад в производство и реализацию конкурентоспособной продукции

Разрешением технических противоречий в наиболее явном виде приходится заниматься в основном в процессе интеграции конструкторского и технологического решений, а также основных составляю-

щих технологического решения между собой и со вспомогательными. В рамках остальных направлений значительно большее значение имеют уже организационные, экономические, социальные противоречия и их разрешение. Если же имеющиеся противоречия все же могут быть разрешены техническими средствами, то эта задача решается, как правило, на уровне конструкторского и технологического решений и только затем переносится на уровень организационного и управленческого. Таким образом, при рассмотрении процесса разработки интегрированной технологии с позиций разрешения технических противоречий, наибольший интерес представляют интеграция основных составляющих технологического решения между собой и со вспомогательными, а также конструкторских решений с технологическими.

Разработка оптимального технологического решения сводится к анализу известного множества технологических решений N по степени обеспечения качества продукции, сроков ее изготовления и величине затрат на ее производство и реализацию в зависимости от приоритетности каждого из перечисленных факторов в конкретных рыночных и производственных условиях. Пример последовательности такого анализа приведен на рисунке 5.

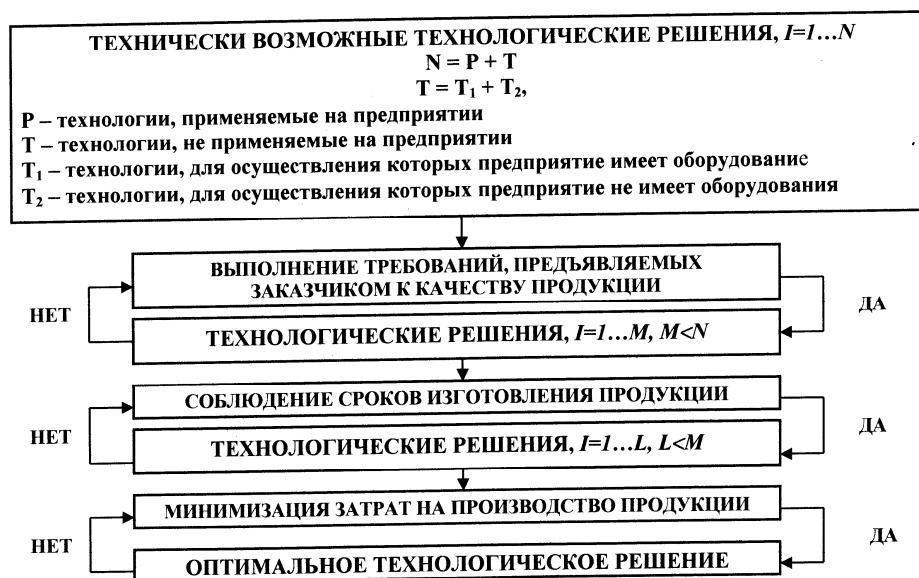


Рисунок 5 – Последовательность выбора оптимального технологического решения

Отработка конструкции изделия на технологичность предполагает изучение известных способов изготовления того или иного изделия. Этому направлению посвящена обширная специальная литература, а процедуры отработки изделия на технологичность стандартизированы, например, [6]. В настоящее время наиболее актуальными вопросами отработки изделия на технологичность является выбор наиболее эффективных по технико-экономическим показателям мероприятий по технологической подготовке производства, а также методов и средств контроля качества выпускаемой продукции. Множество технически возможных технологических решений N состоит из двух подмножеств P и T , где $P+T=N$ и P – технологии, применяемые на предприятии, T – известные технологии, но не применяемые на предприятии. В свою очередь подмножество T также состоит из двух подмножеств T_1 – технологии, для осуществления которых предприятие имеет необходимое оборудование хотя бы частично и T_2 – технологии, для осуществления которых предприятие не имеет оборудования. В зависимости от поставленной цели, а также конкретных рыночных и производственных условий, поиск оптимального технологического решения ведется либо сразу во всем множестве N , как это показано на рисунке 5, либо сначала в подмножестве P , затем в подмножествах T_1 и T_2 . Однако для современной техники характерна работа в очень жестких условиях, причем это нередко является единственной возможностью обеспечить работоспособность и конкурентоспособность разрабатываемого и изготавливаемого изделия. В этом случае традиционных, известных технологий множества N может оказаться недостаточно. В результате появляется необходимость в разработке новой, интегрированной технологии, при которой удастся разрешить возникающие при реализации традиционных технологий противоречия. Именно в этом случае может иметь место совершенствование конструкции изделия за счет совершенствования технологии его изготовления. Следовательно, отработка конструкции на технологичность и совершенствование конструкции изделия за счет совершенствования технологии его изготовления совпадают в том случае, когда выбранное или разработанное технологическое решение разрешает имеющиеся в других случаях противоречия. Интеграция происходит сначала в рамках технологического решения (возможно организационного), затем выходит на уровень конструкторского и, вполне

возможно, управленческого. Следует отметить, что в истории техники можно найти много примеров совершенствования конструкции изделия за счет совершенствования технологии его изготовления. Однако в большинстве случаев технология развивалась отдельно от конструкции и в привязке не к конкретному изделию, а к общему уровню развития науки и техники. Определение интегрированной технологии, как технологии, разрешающей противоречия, позволяет придать разработке новой технологии целевой характер, то есть более тесно увязать ее с разработкой конструкции изделия и даже способом решения задачи, для которой предназначено создаваемое изделие. Это позволяет интенсифицировать сам процесс генерирования интегрирующей идеи или идей, придать ему целевой характер, а не ждать появления такой идеи в связи с естественным развитием науки и техники. Таким образом, интегрированная технология, будучи сама результатом научно-технического прогресса, является одновременно одним из его двигателей.

Наиболее вероятно, что разработку интегрированных технологий придется вести в условиях неполной информации о природе используемых эффектов, а в ходе отработки технологии будут выявляться новые эффекты, как положительно, так и отрицательно влияющие на качество изделия, сроки его создания и себестоимость изготовления. Вполне вероятно также, что реализация наиболее плодотворных интегрирующих идей и наиболее производительных технологий на их базе, на современном этапе развития науки и техники либо в конкретных рыночных и производственных условиях окажется невозможной. Такой вариант развития нельзя считать неудачным, так как в ходе разработки интегрирующей идеи намечаются пути дальнейшего развития предприятия, отрасли, страны, мировой экономики в целом. К тому же вполне реализуемыми могут оказаться другие варианты создания продукции либо решения той задачи, для которой предназначена продукция, в той или иной мере испытывавшие влияние разрабатывавшейся параллельно с ними интегрированной технологии и сами являющиеся таковыми, только с меньшей степенью интеграции. Таким образом, разработка и внедрение интегрированных технологий в любом случае требуют проведения научно-исследовательских работ и способствуют научно-техническому прогрессу.

Следует отметить, что разработка и внедрение интегрированной технологии и совершенствование на ее основе конструкции изделия не обязательно требует использования принципиально нового оборудования. Во многих случаях для реализации интегрированной технологии оказывается возможным использование имеющегося на предприятии оборудования. «Новая техника вовсе не означает новые станки, новое оборудование. Понятие «новая техника» шире – это прежде всего новая, более совершенная, более производительная и более простая технология» [7]. Такой путь совершенствования конструкций изделий за счет совершенствования технологии их изготовления позволяет получить положительный эффект с минимальными затратами времени и средств и в настоящее время. Разумеется, этот подход не отрицает модернизацию парка оборудования и его замену в случае необходимости и при наличии финансовых и технических возможностей для такой замены.

Еще одной характерной особенностью интеграции конструкторского и технологического решения является изменение расчетной методики проектирования, которое как раз и позволит обеспечить соответствие разрабатываемого изделия самым высоким требованиям и его работоспособность в жестких условиях. Речь идет не о технологии проектирования вообще, которая во многих случаях сводится к изменению формы представления данных: ручное проектирование с изготовлением чертежей на бумаге заменяется машинным с использованием методов начертательной, а далее аналитической геометрии – при этом методика расчета конструкций на прочность, жесткость и т.д. остается неизменной. Даже использование CAD-CAM-CAE систем для расчета конструкций само по себе в корне не изменяет методику расчета с точки зрения учета в ней разрешения противоречий между факторами, влияющими на принятие конструкторских и технологических решений – аналитические методы расчета заменяются численными, которые в свою очередь основаны на тех же дифференциальных либо линейных уравнениях. При этом физико-механические и другие свойства материалов, коэффициенты запаса прочности, нагрузки, действующие на изделие, критерии оптимизации и т.д. остаются неизменными. Именно расчетная методика, учитывающая разрешение противоречия при использовании интегрированной технологии, позволяет учесть, например, изменение расчетной схемы,

уменьшение результирующих напряжений в наиболее нагруженных местах конструкции в процессе эксплуатации и другие факторы, способствующие повышению качества изделия и получить максимальный эффект от использования интегрированной технологии создания продукции.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

понимание интегрированной технологии как технологии, разрешающей противоречия между факторами, влияющими на принятие технологических, конструкторских, организационных и управленческих решений, позволяет рассматривать ее не только как результат, но и как двигатель научно-технического прогресса, а также перейти от поиска к генерированию интегрирующей идеи методом поиска и разрешения технических противоречий;

разработка, внедрение и распространение интегрированной технологии на все стороны деятельности предприятия в общем случае способствует организации социотехнического производства;

разработка интегрированной технологии в направлении интеграции конструкторского и технологического решений позволяет усовершенствовать конструкцию изделия и повысить ее технологичность;

разработка и внедрение интегрированной технологии не обязательно предполагает использование нового оборудования;

использование интегрированной технологии позволяет выпускать изделия, соответствующие самым высоким требованиям, предъявляемым к ним.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грабченко А.И. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления/ Под общей редакцией Л.Л. Товажнянского. А.И. Грабченко. – Харьков. 2002 – 140 с.
2. Джур Е.А., Проволоцкий А.Е., Фесенко А.Г. и др. Цели и направления разработки интегрированных технологий производства машиностроительной продукции. Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ “ХПІ”. – Харків, 2004. – Вип.1(8) – 208 с.
3. Джур Е.А., Проволоцкий А.Е., Фесенко А.Г. и др. Материаловедческое обеспечение интегрированных технологий создания машино-

- строительной продукции. Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків, 2004. – Вип.2(9) – 275 с.
4. Т. Ретсина, С. Розиноу Примеры практического применения интеграции технологических процессов на целлюлозно-бумажных предприятиях // Інтегровані технології та енергозбереження// Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків; НТУ «ХПІ», 2003 – №3.
5. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. – М.: Сов. радио, 1979. – Кібернетика.
6. Технологичность конструкций изделий: Справочник/ Т.К. Алферова, Ю.Д. Амиров, П.Н. Волков и др.; Под ред. Ю.ДЛ. Амирова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с., ил. – (Б-ка конструктора)
7. Гудов И.И. Судьба рабочего. Изд. 2-е. испр. и доп. – М., Политиздат. 1974, 479 с.

Получено 26.12.2005 г.

СТАЦИОНАРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЁТОМ КАЛЕНДАРНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Одним из основных средств повышения надежности технических систем в процессе их эксплуатации является профилактическое техническое обслуживание (ТО). Из работ, освещающих математические аспекты профилактического ТО систем, необходимо отметить [1-3], в которых можно найти обширную библиографию по данному вопросу.

В настоящей работе исследуется стратегия профилактики однокомпонентной технологической системы, при которой профилактическое ТО планируется проводить через определенный промежуток времени. Близкая стратегия, известная в литературе как стратегия восстановления блоками [2], предполагает мгновенное восстановление в случае отказа системы. В данной работе предполагается, что аварийное восстановление продолжается некоторое случайное время. При этом предположении становится возможной ситуация, когда в планируемый момент проведения ТО система находится в отказе, тогда ТО переносится на следующий срок. Необходимо при данной стратегии профилактики определить среднюю стационарную наработку на отказ, среднее стационарное время восстановления, стационарный коэффициент готовности, среднее время между моментами фактического проведения ТО, экономические показатели качества функционирования системы. Отметим, что в работе [4] найдены приближенные значения указанных характеристик рассматриваемой системы с помощью метода, основанного на алгоритме фазового укрупнения.

Опишем порядок функционирования рассматриваемой системы, которая состоит из одной технологической ячейки (ТЯ). Ячейка может находиться в двух состояниях: работоспособном и отказовом. Переход из работоспособного состояния в отказовое наступает либо в результате внезапного отказа, индикация которого происходит мгновенно, либо в результате планового ТО ячейки. Восстановления, которые проводятся после внезапных отказов, будем называть аварийными, а восстановления, которые проводятся во время ТО, будем называть профилактическими.

© Песчанский А.И., 2006

Время безотказной работы ТЯ - случайная величина (СВ) α с функцией распределения (ФР) $F(t) = P(\alpha \leq t)$. В момент начала работы (нулевой момент времени) планируется проведение профилактического ТО через время τ . Если отказ системы происходит ранее, тогда в момент отказа начинается аварийное восстановление, которое длится случайное время β с ФР $G(t) = P(\beta \leq t)$. Если в назначенный момент проведения ТО система находится в работоспособном состоянии, тогда проводится ТО, продолжительность которого СВ β_p с ФР $G_p(t) = P(\beta_p \leq t)$. После проведения любой из восстановительных работ система полностью обновляется. По окончании профилактического ТО последующая предупредительная профилактика перепланируется через время τ . Если же в плановый момент проведения ТО система находится в отказе, тогда срок проведения ТО переносится на время τ . Предполагается, что время аварийного восстановления меньше времени между моментами планируемого ТО, т.е. $P(\beta \leq \tau) = 1$, СВ α, β, β_p независимы, имеют плотности распределения $f(t), g(t), g_p(t)$ соответственно, конечные математические ожидания и дисперсии. Таким образом, функционирование ТЯ представляет собой последовательность следующих друг за другом периодов работы и аварийного или профилактического восстановления.

Функционирование ТЯ опишем полумарковским процессом (ПМП) $\xi(t)$ с дискретно-непрерывным фазовым пространством [5]. Введем следующее множество полумарковских состояний системы: $E = \{0, 11\tau, 11x, 10x, 20x, 0 < x < \tau\}$:

11τ - профилактическое ТО завершено, работа ТЯ начинается сначала; время до следующего планового ТО равно τ ;

0 - работа ТЯ прервана, началось профилактическое ТО;

$10x$ - произошел отказ ТЯ, началось аварийное восстановление; время, оставшееся до момента планового ТО равно x , $0 < x < \tau$;

$11x$ - произошло восстановление ТЯ, время до момента планового ТО равно x , $0 < x < \tau$;

$20x$ - наступил момент планового ТО, профилактика не проводится; время, оставшееся до окончания аварийного восстановления ТЯ, равно x , $0 < x < \tau$.

Определим вероятности переходов вложенной цепи Маркова (ВЦМ) $\{\xi_n, n \geq 0\}$ ПМП $\xi(t)$, описывающего функционирование системы:

$$\begin{aligned} P_0^{11\tau} &= 1, & P_{11\tau}^0 &= \bar{F}(\tau), & p_{11\tau}^{10x} &= f(\tau-x), 0 < x < \tau, & p_{11y}^{11x} &= g(y-x), 0 < x < y < \tau, \\ p_{10y}^{20x} &= g(y+x), 0 < x < \tau-y, & p_{11y}^{10x} &= f(y-x), 0 < x < y < \tau, & P_{11x}^0 &= \bar{F}(x), 0 < x < \tau, \\ P_{20x}^{11(\tau-x)} &= 1, 0 < x < \tau. \end{aligned}$$

Нетрудно найти времена пребывания на переходах ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$, например: $\theta_0^{11\tau} = \beta_p$, $\theta_{10y}^{11\tau} = y - x$, $\theta_{10y}^{20\tau} = y$. Таким образом, задан процесс марковского восстановления $\{\xi_n, \theta_n, n \geq 0\}$, а следовательно, и соответствующий ему ПМП $\xi(t)$.

Перейдем к нахождению стационарного распределения ВЦМ. Обозначим через ρ_0 , ρ_1 значения стационарного распределения ВЦМ на состояниях 0 и 11 τ , а через $\rho(11x)$, $\rho(10x)$, $\rho(20x)$ - стационарные плотности состояний 11 x , 10 x , 20 x соответственно. Система интегральных уравнений для стационарных распределений имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho(11x) &= \int_x^\tau g(y-x)\rho(10y)dy + \rho(20(\tau-x)), 0 < x < \tau, \\ \rho(10x) &= \int_x^\tau f(y-x)\rho(11y)dy + \rho_1 f(\tau-x), 0 < x < \tau, \\ \rho(20x) &= \int_0^{\tau-x} g(y+x)\rho(10y)dy, 0 < x < \tau, \\ \rho_1 &= \rho_0 = \rho_1 \bar{F}(\tau) + \int_0^\tau \bar{F}(x)\rho(11x)dx, \\ \rho_0 + \rho_1 + \int [\rho(11x) + \rho(10x) + \rho(20x)]dx &= 1. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Исключая из этой системы функции $\rho(10x)$ и $\rho(20x)$, получаем относительно плотности $\rho(11x)$ уравнение:

$$\begin{aligned} \rho(11x) &= \int_x^\tau \rho(11y)dy \int_0^{y-x} f(y-x-s)g(s)ds + \int_0^\tau \rho(11y)dy \int_0^{x \wedge y} g(\tau-x-s)f(y-s)ds + \\ &+ \rho_1 \int_x^\tau g(y-x)f(\tau-y)dy + \rho_1 \int_0^x g(\tau-x+y)f(\tau-y)dy, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\wedge$ - знак минимума. Введем в рассмотрение интегральный оператор

$$(\Gamma\varphi)(x) = \int_0^{\tau} \gamma(x, y)\varphi(y)dy, \quad (3)$$

где

$$\gamma(x, y) = \begin{cases} \int_0^{y-x} f(y-x-s)g(s)ds + \int_0^x g(\tau-x+s)f(y-s)ds, & 0 < x < y \leq \tau, \\ \int_0^y g(\tau-x+s)f(y-s)ds, & 0 < y < x < \tau, \end{cases}$$

Тогда интегральное уравнение (2) запишется в операторной форме следующим образом:

$$\rho(11x) = \Gamma\rho(11x) + \rho_1\gamma(x, \tau), 0 < x < \tau. \quad (4)$$

Отметим, что $\gamma(x, y)$ - плотность вероятности (табу-вероятности [6]) перехода из состояния $11y$ в состояние $11x$ с запрещением попадания в состояния 0 , $11z, 0 < z \leq \tau$

Докажем, что при условии $F(\tau) = P(\alpha < \tau) < 1$, норма оператора Γ в пространстве $L[0, \tau]$ - суммируемых на отрезке $[0, \tau]$ функций, меньше 1. Действительно,

$$\begin{aligned} \|\Gamma\varphi\| &\leq \int_0^{\tau} |\varphi(y)|dy \int_0^{\tau} \gamma(x, y)dx = \int_0^{\tau} |\varphi(y)|dy \left(\int_0^{\tau} dx \int_0^{y-x} f(y-x-s)g(s)ds + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{\tau} dx \int_0^{y \wedge x} g(\tau-x+s)f(y-s)ds \right) = \int_0^{\tau} |\varphi(y)|dy \left(\int_0^y f(y-s)G(s)ds + \int_0^y f(y-s)\overline{G}(s)ds \right) = \\ &= \int_0^{\tau} F(y)|\varphi(y)|dy \leq F(\tau)\|\varphi\|. \end{aligned}$$

Следовательно, уравнение (4) имеет единственное решение, которое может быть найдено методом последовательных приближений. Стационарное распределение ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$ определяется формулами

$$\begin{cases} \rho(11x) = \rho_1 h_{\gamma}(x, \tau), \rho_0 = \rho_1 \\ \rho(10x) = \rho_1 \int_x^{\tau} f(y-x)h_{\gamma}(y, \tau)dy + \rho_1 f(\tau-x) \\ \rho(20x) = \rho_1 \int_0^{\tau-x} g(x+s)ds \int_s^{\tau} f(y-s)h_{\gamma}(y, \tau)dy + \rho_1 \int_0^{\tau-x} g(x+y)f(\tau-y)dy, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$h_{\gamma}(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma^{(n)}(x, \tau), \quad \gamma^{(n)}(x, \tau) = \int_0^{\tau} \gamma(x, s) \gamma^{(n-1)}(s, \tau) ds, \quad \gamma^{(1)}(x, \tau) = \gamma(x, \tau),$$

постоянная ρ_1 находится из условия нормировки:

$$\rho_1 = (2 + 2H_{\gamma}(\tau, \tau) + \int_0^{\tau} f(\tau - x) \overline{G}(x) dx + \int_0^{\tau} h_{\gamma}(y, \tau) dy \int_0^y f(y - x) \overline{G}(x) dx)^{-1},$$

$$H_{\gamma}(\tau, \tau) = \int_0^{\tau} h_{\gamma}(x, \tau) dx.$$

Перейдем к нахождению стационарных характеристик рассматриваемой системы. Множество состояний системы E разобьем на два непересекающихся подмножества: $E_+ = \{11\tau, 11x\}$ - подмножество работоспособных состояний и $E_- = \{0, 10x, 20x\}$ - подмножество отказов состояний. Среднюю стационарную наработку на отказ T_+ и среднее стационарное время восстановления T_- найдем по формулам [5]

$$T_+ = \frac{\int_{E_+} m(z) \rho(dz)}{\int_{E_+} \rho(dz) P(z, E_-)}, \quad T_- = \frac{\int_{E_-} m(z) \rho(dz)}{\int_{E_-} \rho(dz) P(z, E_-)},$$

где $\rho(dx)$ - стационарное распределение, $P(x, dy)$ - вероятность переходов ВЦМ $\{\xi_n, n \geq 0\}$, $m(x)$ - средние времена пребывания в состояниях системы. Средние времена пребывания в состояниях определяются формулами

$$m(0) = M\beta_p, \quad m(11x) = M(\alpha \wedge x) = \int_0^x \overline{F}(t) dt, \quad 0 < x \leq \tau, \quad m(10x) = M(\beta \wedge x) = \int_0^x \overline{G}(t) dt,$$

$$m(20x) = x.$$

Учитывая формулы (5) и систему уравнений (1), получаем:

$$\int_{E_+} \rho(dz) P(z, E_-) = \rho_1 + \int_0^{\tau} \rho(11x) dx = \rho_1 (1 + \int_0^{\tau} h_{\gamma}(x, \tau) dx) = \rho_1 (1 + H_{\gamma}(\tau, \tau)),$$

$$\int_{E_+} m(x) \rho(dx) = \rho_1 \int_0^{\tau} \overline{F}(t) dt + \int_0^{\tau} \rho(11x) dx \int_0^x \overline{F}(t) dt = \rho_1 \int_0^{\tau} \overline{F}(t) dt + \rho_1 \int_0^{\tau} h_{\gamma}(x, \tau) dx \int_0^x \overline{F}(t) dt,$$

$$\begin{aligned}
\int_{E_-} m(x) \rho(dx) &= \rho_1 M\beta_p + \int_0^\tau \rho(10x) dx \int_0^x \bar{G}(t) dt + \int_0^\tau x \rho(20x) dx = \rho_1 M\beta_p + \\
&+ \int_0^\tau \rho(10x) dx \int_0^x \bar{G}(t) dt + \int_0^\tau x dx \int_0^{\tau-x} g(x+y) \rho(10y) dy = \\
&= \rho_1 M\beta_p + \int_0^\tau \rho(10x) dx \int_0^x \bar{G}(t) dt + \int_0^\tau \rho(10y) dy \int_y^\tau \bar{G}(t) dt = \\
&= \rho_1 M\beta_p + M\beta \int_0^\tau \rho(10x) dx = \rho_1 M\beta_p + M\beta \int_0^\tau \rho(11x) dx = \rho_1 (M\beta_p + M\beta H_\gamma(\tau, \tau)).
\end{aligned}$$

Следовательно,

$$T_+ = \frac{\int_0^\tau \bar{F}(t) dt + \int_0^\tau h_\gamma(x, \tau) dx \int_0^x \bar{F}(t) dt}{1 + H_\gamma(\tau, \tau)}, \quad T_- = \frac{M\beta_p + M\beta H_\gamma(\tau, \tau)}{1 + H_\gamma(\tau, \tau)}.$$

Стационарный коэффициент готовности системы равен

$$K_s = \frac{T_+}{T_+ + T_-} = \frac{\int_0^\tau \bar{F}(t) dt + \int_0^\tau h_\gamma(x, \tau) dx \int_0^x \bar{F}(t) dt}{\int_0^\tau \bar{F}(t) dt + \int_0^\tau h_\gamma(x, \tau) dx \int_0^x \bar{F}(t) dt + M\beta_p + M\beta H_\gamma(\tau, \tau)}. \quad (6)$$

Перейдем к определению среднего времени между моментами реального проведения профилактического ТО. ПМП $\xi(t)$ является регенерирующим процессом. Точками регенерации этого процесса являются моменты попадания системы в состояние 11τ . Найдем среднюю длительность периода регенерации, который складывается из времени профилактического ТО и времени пребывания процесса $\xi(t)$ в подмножестве состояний $E_0 = \{11\tau, 11x, 10x, 20x\}$ с начальным состоянием 11τ . Введем $\varsigma_{11\tau} \varsigma_{10x} \varsigma_{11x} \varsigma_{20x}$ времена пребывания ПМП $\xi(t)$ в подмножестве состояний E_0 с начальными состояниями $11\tau, 11x, 10x, 20x$ соответственно. Для средних времен пребывания в подмножестве состояний E_0 т.е. для

$M\varsigma_{11\tau} = u(11\tau), \quad M\varsigma_{10x} = u(10x), \quad M\varsigma_{11x} = u(11x), \quad M\varsigma_{20x} = u(20x)$ запишем систему уравнений марковского восстановления [5]:

$$\begin{cases} u(10x) = \int_0^x g(x-y)u(11y)dy + \int_0^{\tau-x} g(x+y)u(20y)dy + \int_0^x \bar{G}(t)dt, 0 < x < \tau, \\ u(11x) = \int_0^x f(x-y)u(10y)dy + \int_0^x \bar{F}(t)dt, 0 < x \leq \tau, \\ u(20x) = u(11(\tau-x)) + x, 0 < x < \tau. \end{cases}$$

Исключим из этой системы уравнений функции $u(20x)$ и $u(10x)$:

$$\begin{aligned} u(21x) &= \int_0^x u(11y)dy \int_0^{x-y} f(x-y-s)g(s)ds = \int_0^x u(11y)dy \int_0^{x \wedge y} f(x-s)g(s+\tau-y)ds = \\ &= \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta F(x). \end{aligned}$$

В интегральной форме это уравнение имеет вид

$$u(21x) = \Gamma' u(11x) + \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta F(x),$$

где $\Gamma' u(11x) = \int_0^\tau \gamma(y, x)u(11y)dy$ - оператор, союзный оператору, определенному формулой (3). Норма этого оператора в пространстве функций $L[0, \tau]$ меньше единицы и решение уравнения (7) задается формулой

$$u(11x) = \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta F(x) + \int_0^\tau h_\gamma(y, x)dy \int_0^y \bar{F}(t)dt + M\beta \int_0^\tau h_\gamma(y, x)F(y)dy.$$

Учитывая, что

$$\int_0^\tau \gamma(y, x)dy = F(x), \quad F(x) + \int_0^\tau h_\gamma(y, x)F(y)dy = \int_0^\tau h_\gamma(y, x)dy,$$

преобразуем выражение для $u(11x)$ к виду

$$u(11x) = \int_0^x \bar{F}(t)dt + \int_0^\tau h_\gamma(y, x)dy \int_0^y \bar{F}(t)dt + M\beta \int_0^\tau h_\gamma(y, x)dy.$$

Следовательно,

$$u(11\tau) = \int_0^\tau \bar{F}(t)dt + \int_0^\tau h_\gamma(y, x)dy \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta H_\gamma(\tau, \tau).$$

Таким образом, среднее время MX между моментами проведения реального профилактического ТО определяется формулой:

$$MX = u(11\tau) + M\beta_p = M\beta_p \int_0^\tau \bar{F}(t)dt + \int_0^\tau h_\gamma(y, x)dy \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta H_\gamma(\tau, \tau). \quad (8)$$

Выясним вероятностный смысл величины $H_\gamma(\tau, \tau)$. Обозначим через v число попаданий ПМП $\xi(t)$ в состояния $11x, 0 < x < \tau$, на периоде регенерации, стартуя из состояния 11τ . Вероятность того, что эта случайная величина принимает значение n находится по формуле $P(v = n) = \int_0^\tau \gamma^{(n)}(x, \tau) \bar{F}(x)dx$.

Найдем математическое ожидание этой величины.

$$\begin{aligned} Mv &= \sum_{n=1}^{\infty} n \int_0^\tau \gamma^{(n)}(x, \tau) \bar{F}(x)dx = \sum_{n=1}^{\infty} n \left(\int_0^\tau \gamma^{(n)}(x, \tau)dx - \int_0^\tau \gamma^{(n)}(x, \tau)F(x)dx \right) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n \left(\int_0^\tau \gamma^{(n)}(x, \tau)dx - \int_0^\tau \gamma^{(n+1)}(x, \tau)dx \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^\tau \gamma^{(n)}(x, \tau)dx = H_\gamma(\tau, \tau). \end{aligned}$$

Поскольку в состояние 11τ система попадает из состояния аварийного отказа $10y$, то $H_\gamma(\tau, \tau)$ - среднее число аварийных отказов системы на периоде регенерации.

Покажем, что формулу (8), по которой определяется средняя длительность периода регенерации, можно преобразовать к виду, в котором явно фигурирует промежуток времени τ . Для этого умножим обе части первых трех уравнений системы (1) на x и проинтегрируем в пределах от 0 до τ , получим:

$$\begin{cases} \int_0^\tau x\rho(11x)dx = \int_0^\tau \rho(10x)dx \int_0^x G(t)dt + \tau \int_0^\tau \rho(20x)dx - x \int_0^\tau \rho(20x)dx, \\ \int_0^\tau x\rho(10x)dx = \int_0^\tau \rho(11x)dx \int_0^x F(t)dt + \int_0^\tau F(t)dt, \\ \int_0^\tau x\rho(20x)dx = M\beta \int_0^\tau \rho(10x)dx - x \int_0^\tau \rho(10x)dx \int_0^x \bar{G}(t)dt. \end{cases}$$

Сложим почленно первые два уравнения этой системы и учтем, что

$$\int_0^{\tau} \rho(10x)dx = \int_0^{\tau} \rho(11x)dx,$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\tau} \rho(11x)dx \int_0^x \bar{F}(t)dt + \int_0^{\tau} \rho(10x)dx \int_0^x \bar{G}(t)dt + \int_0^{\tau} x\rho(20x)dx + \rho_1 \int_0^{\tau} \bar{F}(t)dt = \\ = \rho_1 \tau + \tau \int_0^{\tau} \rho(20x)dx; \end{aligned}$$

$$\int_0^{\tau} \rho(11x)dx \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta \int_0^{\tau} \rho(11x)dx + \rho_1 \int_0^{\tau} \bar{F}(t)dt = \rho_1 \tau + \tau \int_0^{\tau} \rho(20x)dx$$

После несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} MX = M\beta_p + \frac{1}{\rho_1} \left(\int_0^{\tau} \rho(11x)dx \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta \int_0^{\tau} \rho(11x)dx + \rho_1 \int_0^{\tau} \bar{F}(t)dt \right) = M\beta_p + \tau + \\ + \frac{\tau}{\rho_1} \int_0^{\tau} \rho(20x)dx = M\beta_p + \tau \left(1 + \int_0^{\tau} f(\tau-x)\bar{G}(x)dx + \int_0^{\tau} h_{\gamma}(y, \tau)dy \int_0^y f(y-x)\bar{G}(x)dx \right). \end{aligned}$$

Среднее время восстановления $MX^{(0)}$ за период регенерации равно $MX^{(0)} = M\beta_p + M\beta H_{\gamma}(\tau, \tau)$, поэтому коэффициент готовности можно определить и по формуле [3]: $K_z = 1 - \frac{MX^{(0)}}{MX}$,

$$K_z = \frac{M\beta_p + M\beta H_{\gamma}(\tau, \tau)}{M\beta_p + \tau \left(1 + \int_0^{\tau} f(\tau-x)\bar{G}(x)dx + \int_0^{\tau} h_{\gamma}(y, \tau)dy \int_0^y f(y-x)\bar{G}(x)dx \right)}.$$

Определим экономические показатели функционирования ТЯ на бесконечном интервале времени. Введем следующие обозначения: c_0 - прибыль, получаемая за единицу времени исправного функционирования ТЯ; c_h - затраты за единицу времени аварийного восстановления ТЯ; c_p - затраты за единицу времени профилактического ТО ТЯ. Для регенерирующего процесса средняя прибыль за единицу календарного времени S и средние затраты за единицу исправного функционирования C определяются формулами [3]: $S = \frac{M\tilde{S}}{MX}$, $S = \frac{M\tilde{C}}{MX^{(1)}}$, где X - длительность периода регенерации,

$MX^{(1)}$ - время исправного функционирования системы в период регенерации, $\tilde{S}$ - прибыль, полученная на периоде регенерации; $\tilde{C}$ - затраты, имевшие место на периоде регенерации. Следовательно,

$$S = c_0 - \frac{(c_0 + c_p)M\beta_p + (c_0 + c_h)M\beta H_\gamma(\tau, \tau)}{\int_0^\tau \bar{F}(t)dt + \int_0^\tau h_\gamma(x, \tau)dx \int_0^x \bar{F}(t)dt + M\beta_p + M\beta H_\gamma(\tau, \tau)},$$

$$C = \frac{c_p M\beta_p + c_h M\beta H_\gamma(\tau, \tau)}{\int_0^\tau \bar{F}(t)dt + \int_0^\tau h_\gamma(x, \tau)dx \int_0^x \bar{F}(t)dt}.$$

Найдем приближенные формулы для вычисления стационарных надежностных и экономических характеристик системы в предположении, что время безотказной работы ТЯ намного больше времени аварийного восстановления. В этом случае вероятность того, что в планируемый момент профилактического ТО ТЯ будет находиться в работоспособном состоянии значительно больше вероятности нахождения ТЯ в состоянии аварийного восстановления. Поэтому

$\gamma(x, \tau) \approx (f * g)(\tau - x)$, $h_\gamma(x, \tau) \approx h_1(\tau - x)$, где $h_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (f * g)^{(n)}(x)$, - плотность

функции восстановления $H_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (F * G)^{(n)}(x)$ альтернирующего процесса восстановления. Стационарные надежностные и экономические показатели функционирования ТЯ приближенно вычисляются по формулам:

$$T_+ \approx \frac{\tau \tilde{K}(\tau)}{1 + H_1(\tau)}, \quad T_- \approx \frac{M\beta_p + M\beta H_1(\tau)}{1 + H_1(\tau)}, \quad K_e \approx \frac{\tau \tilde{K}(\tau)}{\tau \tilde{K}(\tau) + M\beta_p + M\beta H_1(\tau)},$$

$$S \approx \frac{c_0 \tau \tilde{K}(\tau) - c_p M\beta_p - c_h M\beta H_1(\tau)}{\tau \tilde{K}(\tau) + M\beta_p + M\beta H_1(\tau)}, \quad C \approx \frac{c_p M\beta_p + c_h M\beta H_1(\tau)}{\tau \tilde{K}(\tau)},$$

где $\tilde{K}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau K(t)dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \bar{F}(t)dt + \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \bar{F}(t)H_1(\tau - t)dt$ - нестационарный средний

коэффициент готовности системы, $K(\tau) = \bar{F}(\tau) + \int_0^\tau \bar{F}(t)h_1(\tau - t)dt$ - нестационарный коэффициент готовности [2].

Оптимальные промежутки времени τ_k , τ_s , τ_c между планируемыми моментами проведения профилактического ТО, при которых соответствующие показатели K_z , S , C достигают оптимальных значений, удовлетворяют соответственно уравнениям:

$$\tau h_1(\tau) \frac{\tilde{K}(\tau)}{K(\tau)} - H_1(\tau) = \frac{M\beta_p}{M\beta},$$

$$\tau h_1(\tau) \frac{\tilde{K}(\tau)}{K(\tau)} + \frac{c_h - c_p}{c_h + c_0} \frac{M\beta_p}{K(\tau)} h_1(\tau) - H_1(\tau) = \frac{c_0 + c_p}{c_0 + c_h} \frac{M\beta_p}{M\beta},$$

$$\tau h_1(\tau) \frac{\tilde{K}(\tau)}{K(\tau)} - H_1(\tau) = \frac{c_p}{c_h} \frac{M\beta_p}{M\beta}.$$

В случае существования единственных корней этих уравнений оптимальные значения показателей качества функционирования системы определяются формулами:

$$K_z(\tau_k) \approx \frac{K(\tau_k)}{K(\tau_k) + M\beta h_1(\tau_k)}, \quad S(\tau_s) \approx \frac{c_0 K(\tau_s) - c_h M\beta h_1(\tau_s)}{K(\tau_s) + M\beta h_1(\tau_s)}, \quad C(\tau_c) \approx \frac{c_h M\beta h_1(\tau_c)}{K(\tau_c)}.$$

Если уравнения (8) - (10) имеют несколько корней, оптимальные значения показателей находятся прямой подстановкой каждого из них в формулу для случая единственного корня с последующим выбором наилучшего из них, причем необходимо учесть значение показателя при $\tau = \infty$, $K_z(\infty) = \frac{M\alpha}{M\alpha + M\beta}$, $S(\infty) \approx \frac{c_0 M\alpha - c_h M\beta}{M\alpha + M\beta}$, $C(\infty) = \frac{c_h M\beta}{M\alpha}$.

Таким образом, полученные формулы позволяют определить промежутки времени, через которые необходимо проводить ТО для достижения оптимальных значений надёжных и экономических показателей качества функционирования рассматриваемой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надёжности. - М.: Сов. радио, 1969. - 488 с.
2. Байхельт Ф. Франкен П. Надёжность техническое обслуживание. Математический подход. - М.: Радио и Связь, 1988. - 392 с.

3. Барзилович Е.Ю. Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М.: Сов. радио, 1971. – 272 с.
4. Обжерин Ю.Е., Глеч С.Г. Полумарковская модель технологической ячейки с учетом профилактики./ Оптимизация произв. процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2001. – Вып. 4.-С.-123-127.
5. Корольюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надёжности систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
6. Корлат А.Н., Кузнецов В.Н., Новиков М.И., Турбин А.Ф. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания. – Кишинёв: Штиинца, 1991. – 209 с.

Получено 15.03.2006 г.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНОГРАММ ВЫКЛАДКИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТОРГОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Введение. Эффективность работы торговой точки определяется многочисленными и разноплановыми факторами, в том числе и размещением товаров в пространстве торгового зала. Известно, что оптимизация выкладки может увеличить доход на единицу экспозиционной площади на 15% [1]. Однако сложность учета многообразных и, часто, противоречивых требований к выкладке, неизбежно приводит к идее разработки систем поддержки принятия решений. Первые программные средства для решения задач мерчендайзинга появились на этапе развития сетевых торговых структур. Действительно, в условиях крупных торговых сетей особенно необходим централизованный контроль качества представления товаров и полноты выкладки в многочисленных торговых точках. Для этих целей стали применяться компьютерные планограммы - схемы размещения товара на торговом оборудовании в конкретных торговых залах.

Все программные продукты электронного мерчендайзинга можно разделить на две основные группы - простые системы визуализации выкладки и более сложные системы, предназначенные для поддержки принятия решений [3].

Одним из примеров систем визуализации является система PlanoGraphics компании Mediatronics Systems (www.planographics.com). В основе системы лежат графические средства редактирования и оформления планограмм с использованием каталогов товаров. В процессе работы товары могут ранжироваться по размерам и прибыльности. Система визуализации выкладки Shelf LogicR компании Logical Planning Systems, Ltd. [3] имеет аналогичные функции, но отличается поддержкой трехсторонних изображений товара.

Основными недостатками систем визуализации является отсутствие возможности программного анализа эффективности выкладки и отсутствие интерфейса с транзакционными системами (комплексными системами управления торговым процессом).

© В.В. Сайко, 2006

На мировом рынке представлено несколько десятков систем, которые можно отнести к классу систем поддержки принятия решений. Часть из них интегрировано в транзакционные системы, другие могут импортировать необходимые данные. Указанные программные средства позволяют строить визуальные представления различных вариантов выкладки товаров и оценивать их с точки зрения прибыльности. В базу данных подобных программных продуктов заносят количество наименований в товарной группе, количество товарных групп, габаритные размеры упаковки, торговые площади, выделенные для каждой из товарных групп, наценку магазина и планируемый товарный запас по каждому наименованию.

Примером такой системы является Apollo (www.infores.com/public/us/techsupport/apollo/default.htm). Модуль Apollo Suite обеспечивает построение планогамм, формирование отчетов и контроль остатков. Одним из наиболее эффективных инструментов автоматизации в Apollo считается формирование планогамм по шаблонам. Вносимое в шаблон изменение автоматически распространяется на все планогаммы, сформированные на основе измененного шаблона.

В системе Retail FOCUS v5.0 компании Advanced Visual Technology (www.visual-technology.co.uk/productsdescription.htm) можно оценить эффективность использования площадей и торгового оборудования, получить реалистичное трехмерное изображение как отдельных стеллажей, так и всего зала. В крупных торговых сетях также широко используются системы Galleria (www.galleria-rts.com/html/company/company.htm) и Spaceman(R) компании AcNielsen [5]. Основными функциями системы Spaceman являются построение планогамм и анализ выкладки. Анализ основан на модели пополнения товарами полочного пространства, учитывает различные варианты автоматического заполнения полок, обеспечивает возможность проверки финансовых результатов полученной выкладки.

Постановка задачи

Ориентация указанных систем на крупные торговые сети предопределила главное содержание современного электронного мерчендайзинга: унификация выкладки для облегчения ее контроля в торговых точках, учет транзакций с целью контроля полноты выкладки и обеспечение реалистичной визуализации, необходимой для проек-

тирования интерьеров многочисленных торговых залов. В качестве основного критерия оценки эффективности проектных решений используется принцип Space To Sale (обеспечение большей площади выкладки для более прибыльных товаров). При этом оценка рациональности товарного соседства и последовательности осмотра экспозиции осуществляется пользователем и, поэтому, не исключает грубых и повторяющихся ошибок.

Правила и законы мерчендайзинга оперируют гораздо большим кругом понятий, чем площадь выкладки и принцип размещения товаров на стеллажах [1,2]. Между тем, простая геометрическая модель торгового пространства, используемая в рассмотренных системах, не позволяет программно реализовать оценку соответствия экспозиционных решений многочисленным требованиям.

Реализация более глубокого анализа выкладки требует более детального анализа торгового пространства с точки зрения структуры, функций и взаимосвязей его элементов. Необходима разработка структурно-функциональной модели торгового пространства, достаточно информативной как для анализа соответствия площади выкладки коммерческой ценности товарной группы, так и для оценки эффективности взаиморасположения товарных групп, оценки видимости экспозиции, определения наиболее вероятного маршрута осмотра экспозиции.

Результаты

Анализируя структуру торгового пространства, следует учитывать особенности его использования при различных режимах обслуживания покупателей (самообслуживание, без использования самообслуживания, комбинированный режим обслуживания). Комбинированный режим предполагает присутствие в торговом зале и торгового оборудования, открытого для доступа покупателей, и оборудования, используемого исключительно продавцом. Далее при разработке модели рассматривается именно комбинированный режим – поскольку он характеризуется большим разнообразием приемов размещения оборудования.

Представим план торгового зала S_T в виде замкнутой области, ограниченной векторами W_j ($j=0,G$), полагая, что W_0 – первый вектор, соответствующий входу в помещение:

$$S_T = \bigcap_{j=0}^G \overline{W}_j(X_j, Y_j, f_j, L_j),$$

где X_j, Y_j – координаты начала вектора, L_j – его длина, f_j – код ориентации (принимает одно из четырех значений: 0, 2, 4 или 6, в зависимости от значения угла наклона – 0, 90, 180 или 270 градусов).

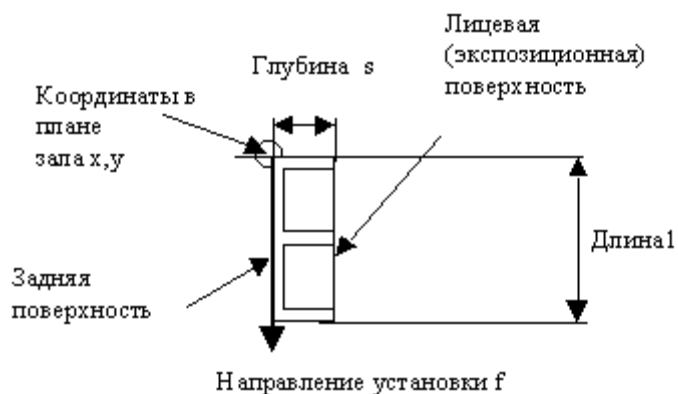


Рис. 1 Векторное представление торгового оборудования

Тогда единицу оборудования можно представить вектором E с аргументами, определяющими положение, ориентацию оборудования в плане торгового зала и его размеры (см. рис. 1). Отметим, что поставленные задачи требуют анализа выкладки с точки зрения взаимного размещения товарных групп в пространстве зала. Введем ряд понятий, необходимых для обеспечения структурной целостности модели.

Экспозиционный контур – группа, образованная торговым оборудованием, топологически связанным друг с другом боковыми или задними поверхностями. Степень топологической связанности единиц оборудования E_i и E_{i+n} будем определять дихотомной функцией $T(E_i, E_{i+n})$, принимающей значение 1 в случае связанности, и 0 – в противном случае. Условимся, что в качестве второго аргумента функции могут использоваться также векторы W .

Целесообразно выделить два типа зон размещения контуров:

- **периферийная зона**, в которой оборудование приближено к стенам помещения;
- **центральная зона**, в которой оборудование открыто для осмотра со всех сторон.

Учитывая особенности комбинированного режима обслуживания, выделим два типа экспозиционных контуров:

- **внутренний** – контур, сформированный из оборудования, которое обслуживается исключительно продавцом, и топологически связано задней поверхностью со стеной помещения или с задней поверхностью другой единицы оборудования, принадлежащего к внутреннему контуру (рис. 2,б);
- **внешним** контур может быть в трех случаях:
 - ✓ контур составлен из оборудования, ограждающего отдел (в этом случае в составе контура должен присутствовать технологический проход и оборудование обслуживается исключительно продавцом – рис. 2,б и рис. 3);
 - ✓ контур, составленный из оборудования, открытого для доступа покупателя (рис. 2,а);
 - ✓ контур, составленный из оборудования, которое открывается продавцом в момент приобретения товара (рис. 2,а).

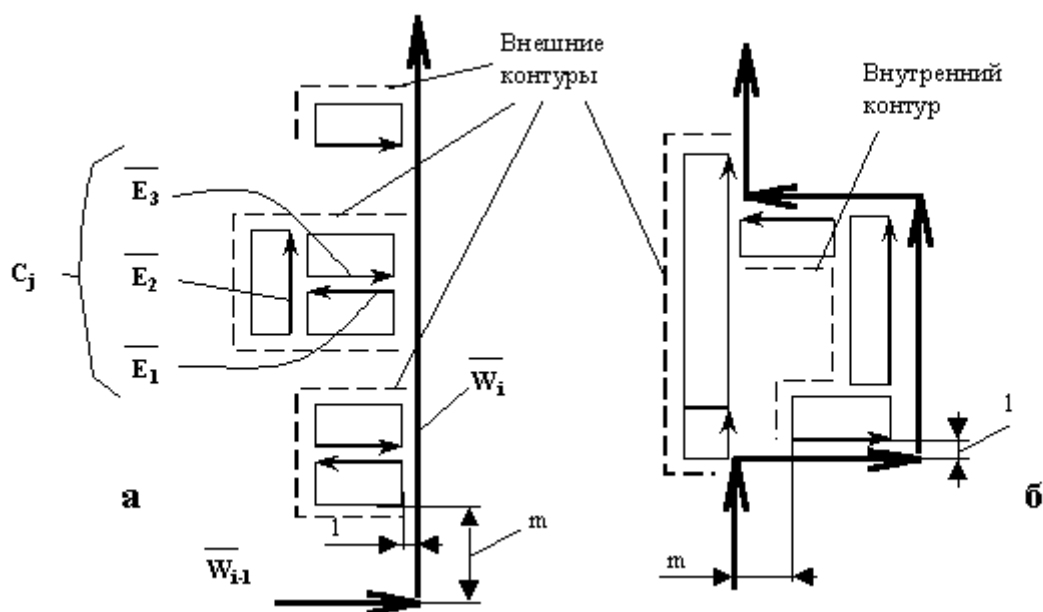


Рис. 2 Пример размещения экспозиционных контуров периферийной зоны

На рис. 2 показано, что все контуры, например, C_j , формируются из упорядоченных элементов, последовательность которых соответствует направлению обхода торгового зала покупателем [4]. Для отдельных элементов на рис. 2 и 3 проиллюстрировано понятие «расстояние от начала стены» (m) и «отступ от стены» (l), которые в дальнейшем используются в процедуре формирования контуров.

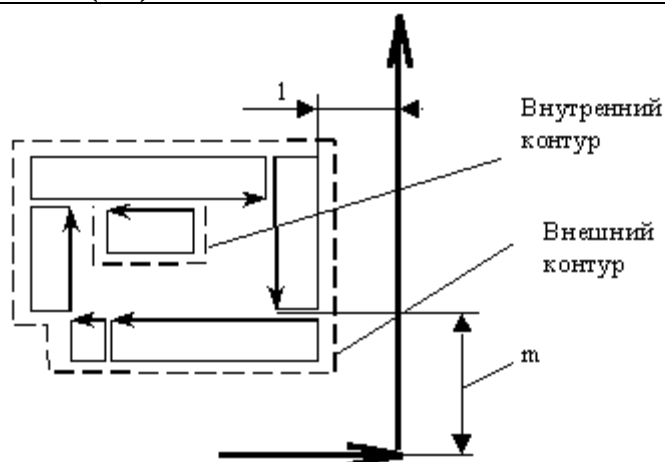


Рис. 3 Пример размещения экспозиционных контуров центральной зоны

Основываясь на введенных понятиях и предложенной классификации контуров, представим вектор E перечнем аргументов, приведенным в таблице 1.

Таблица 1. Параметры, используемые в модели торгового пространства

Параметр	Интерпретация
x, y	Координаты точки привязки единицы оборудования в плане торгового зала
l, s, h	Длина, глубина и высота единицы оборудования. Экспозиционная площадь (R) оборудования вычисляется как произведение l и h .
f	Код ориентации вектора, соответствующего единице оборудования
t	Тип оборудования
v	Код исполнения
z	Стоимость единицы оборудования
q	Тип функционального назначения
$R= r $	Матрица элементарных площадей r , формирующая экспозиционную поверхность оборудования.
d	Характеристика качества обзора – максимальное расстояние отхода покупателя от экспозиционной поверхности оборудования.
c	Номер экспозиционного контура, к которому принадлежит единица оборудования.
F	Тип экспозиционного контура (1- внешний, 0 – внутренний)
P	Зона размещения контура (0 - центральная, 1 – периферийная)
D	Расстояние между центром экспозиционной поверхности и входом в торговый зал
W	Номер вектора, ограничивающего пространство торгового зала, с которым топологически связана единица оборудования
m, l	Вспомогательные параметры

Важной особенностью параметра q , определяющего функциональное назначение оборудования, является то, что он, в ряде случаев, однозначно определяет принадлежность единицы оборудования внешнему или внутреннему контуру (см. табл. 2).

Необходимость трактовки отдельных архитектурных элементов ($q=3$) как оборудования обусловлена, во-первых, принятой последовательностью ввода данных при программной реализации модели, во-вторых, тем, что такие элементы повсеместно используются как носители рекламных материалов или для установки дисплеев.

Покажем, что предложенная форма представления структурно-функциональной модели торгового пространства позволяет организовать программную идентификацию элементов модели и оценить эффективность проектных решений вне зависимости от используемого режима обслуживания покупателей.

Условимся, что в обозначении контуров первый индекс будет означать тип, второй – зону размещения, а третий – номер контура. Например, $C_{1,0j}$ – внешний контур центральной зоны с порядковым номером j .

Таблица 2.

Внутрисистемная кодировка типов функционального назначения оборудования q

Значение q	Интерпретация	Возможность включения в контур...	
		внешний	внутренний
0	Оборудование с закрытой экспозиционной поверхностью	+	-
1	Технологическое оборудование – расчетные узлы, проходы.	+	-
2	Оборудование с открытой экспозиционной поверхностью	+	+
3	Элементы интерьера (колонны, простенки)	+	+

Сформулируем условие принадлежности произвольной единицы оборудования к внешнему контуру периферийной зоны:

$$\forall \bar{E}_i (\bar{E}_i \in C_{1,1j}) \Rightarrow q_i < 2 \vee (q_i > 1 \wedge \exists \bar{E}_k (T(\bar{E}_i, \bar{E}_k) = 1 \wedge \bar{E}_k \in C_{1,1j})), \quad (1)$$

т.е. принадлежность единицы оборудования может быть установлена либо на основании типа ($q_i < 2$), либо с помощью дополнительного анализа связанности $\bar{E}_i$ с элементами уже сформированного внешнего контура.

Условие, при котором единицу оборудования можно идентифицировать как первый элемент $\bar{E}_1$ контура $C_{1,1j}$, связанного с $\bar{W}_k$, можно формализовать следующим образом:

$$\forall \bar{E}_1 (\bar{E}_1 \in C_{1,1j}) \Rightarrow (T(\bar{E}_1, \bar{W}_k) = 1 \wedge m_i = \min) \quad (2)$$

Внешний контур по определению охватывает внутренний, однако это обстоятельство не означает обязательного наличия внутреннего контура при каждом внешнем контуре (см. рис. 2,а). Обозначим индексом «n» последний элемент внешнего контура, т.е.:

$$n = \text{Card}\{\bar{E}_i / \bar{E}_i \in C_{1,1j}\}, \quad (3)$$

тогда условие существования внутреннего контура $C_{1,0m}$ для внешнего контура $C_{1,1j}$, связанного с единственной стеной $\bar{W}_f$, можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \forall C_{1,1j} (C_{1,1j} = \{\bar{E}_i / w_0 = w_1 = \dots = w_n\} \wedge \exists \bar{E}_k (\bar{E}_k \notin C_{1,1j} \wedge m_0 \leq m_k \leq m_n \\ \wedge T(\bar{E}_k, \bar{W}_f) = 1)) \Rightarrow \bar{E}_k \in C_{1,0m} \end{aligned} \quad (4)$$

Факт существования $\bar{E}_k$, выявленный с использованием выражения (4), является основанием для последовательного формирования внутреннего контура $C_{1,0m}$ начиная с элемента, для которого выполняется условие

$$\forall \bar{E}_k (\bar{E}_k \notin C_{1,1j} \wedge T(\bar{E}_k, \bar{W}_f) = 1 \wedge m_k = \min) \Rightarrow k = 1 \quad (5)$$

Если внешний контур охватывает несколько стен, как показано на рис. 3,б, идентификацию элементов внутреннего контура целесообразно производить в соответствии со следующим условием:

$$\begin{aligned} \forall C_{1,1j} (C_{1,1j} = \{\bar{E}_i / w_0 \neq w_n\} \wedge \exists \bar{E}_k (\bar{E}_k \notin C_{1,1j} \wedge w_0 < w_k < w_n \\ \wedge T(\bar{E}_k, \bar{W}_k) = 1)) \Rightarrow \bar{E}_k \in C_{1,0m} \end{aligned} \quad (6)$$

путем последовательного анализа топологической связанности элементов с $\bar{W}_f$ ($f = w_0 \dots w_n$) с использованием (5).

Идентификацию контуров, принадлежащих к центральной зоне, можно проводить только при условии полного формирования конту-

ров периферийной зоны. Только в этом случае при идентификации первых элементов внешних контуров центральной зоны оказывается возможным использование условия (7):

$$\forall \bar{E}_1 (\bar{E}_1 \in C_{0,1m}) \Rightarrow \text{dist}(\bar{W}_0, \bar{E}_1) = \min, \quad (7)$$

где $\bar{W}_0$ - первая дуга S_T , соответствующая входу в торговый зал.

Далее следует использовать условие (1).

Отметим, что поиск внутренних контуров центральной зоны имеет смысл лишь при условии

$$n = \text{Card}\{\bar{E}_i / \bar{E}_i \in C_{0,1j}\} > 2 \wedge T(\bar{E}_1, \bar{E}_n) = 1, \quad (8)$$

т.е. внешний центральный контур замкнут и ограничивает в плане помещения пространство, в котором возможно размещение другого оборудования (рис. 3).

Важной особенностью внешних контуров центральной зоны является их обратная, по отношению к S_T , ориентация, что необходимо учитывать при определении значения $T()$.

Таким образом, логико-математические модели (1-8) позволяют организовать процедуру идентификации и формирования экспозиционных контуров в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 4.

Выводы

В результате проведенного анализа пространственной организации торгового зала предложена рациональная форма его структурно-функциональной модели, базирующейся на концепции экспозиционного контура. Предложены логико-математические модели процесса идентификации экспозиционных контуров различных типов, необходимые для последующей программной реализации модели.

Формализация понятия «экспозиционный контур» позволила обеспечить целостность модели торгового пространства и отразить взаимосвязь ее элементов. Такие характеристики выкладки товарных групп, как, например, порядок в ходе осмотра общей экспозиции зала или качество обзора, ранее не использовались в качестве критериев оценки в системах поддержки принятия решений.

Проведенная работа позволила перейти к программной реализации модуля поддержки принятия решений, связанных с экспозицией товаров в рамках электронного тренинга [2].

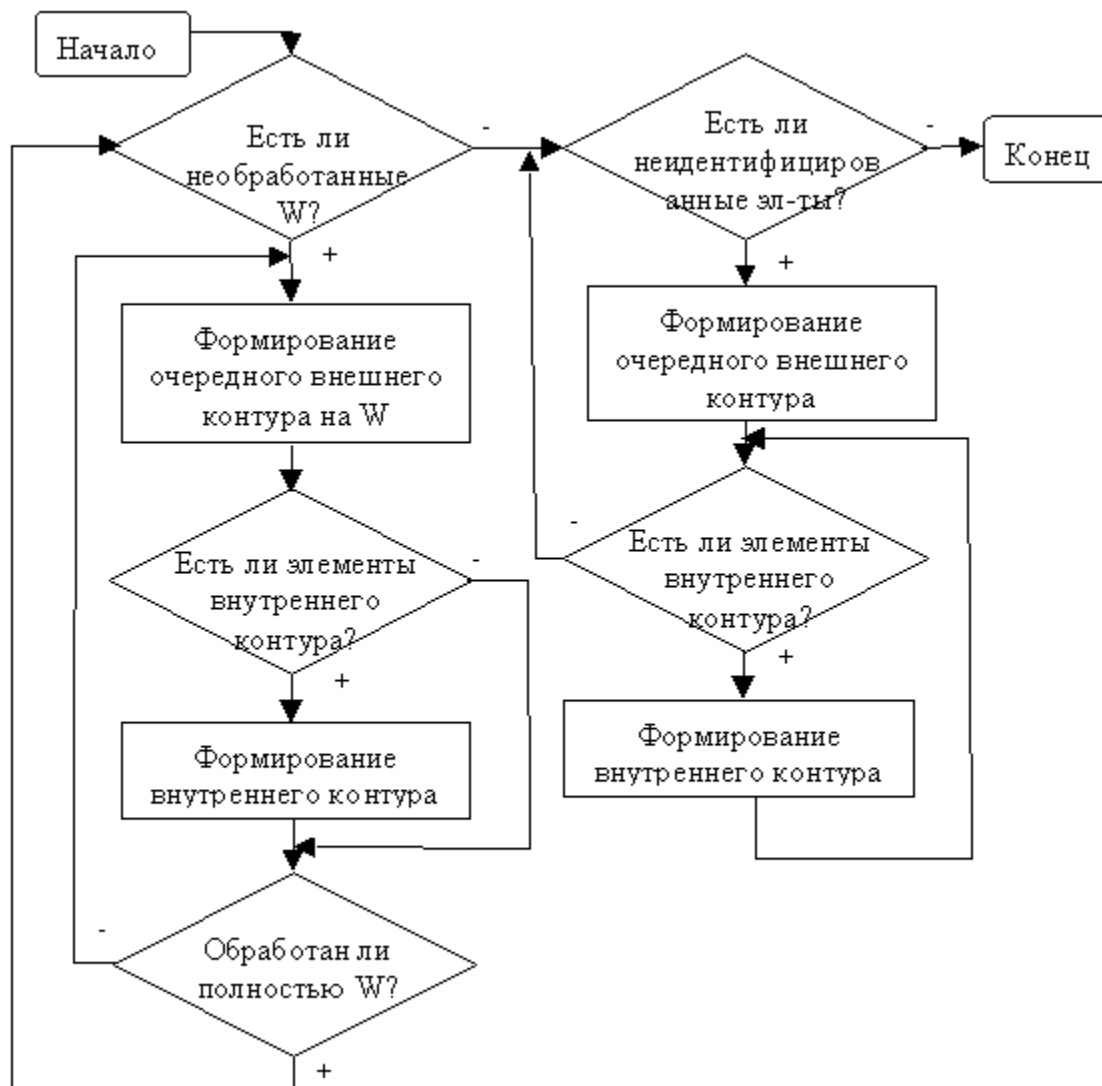


Рис. 4 Обобщенный алгоритм идентификации элементов структурно-функциональной модели торгового пространства

ЛИТЕРАТУРА

1. Коровкина А. Все по полочкам или великое искусство мерчендайзинга //Наука о рекламе.- 2004.-№ 2.- С.23-25.
2. Сайко В.В. Формализация правил мерчендайзинга с использованием нечеткой логики //Сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании». Том.4. Экономика. – Одесса: Черноморье, 2005.- с.16-18.
3. Татунашвили Л. Электронные планограммы как новый инструмент оперативного управления торговыми залами розничной сети // [http://www.interfood.ru /new/shablon1.shtml](http://www.interfood.ru/new/shablon1.shtml).
4. Червак Р. Секреты создания атмосферы супермаркета // Маркетинг и реклама. – 2002. – №5-6. – С. 53-55.

5. ACNielsen Announces New Tool for Simplified Space Management; Spaceman Product Planner Expedites Product Assortment Analysis and Planogram Changes. Business Wire, Feb 3, 2002 // http://www.findarticles.com/p/articles/mi_m0EIN/is_2002_Feb_3/ai_8245355.

Получено 21.03.2006 г.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Введение

В настоящее время ни одно машиностроительное предприятие не обходится без операций транспортирования заготовок и деталей от станка к станку, уборки и переработки металлической стружки и т. д. От этих операций существенно зависит производительность металлорежущего оборудования, а также металлургическая ценность вторичного сырья – металлической стружки.

В условиях механических цехов применяется ряд непрерывных устройств для перемещения стружки от металлорежущих станков до участка ее сбора и переработки. Большая часть этих устройств в процессе транспортирования значительно изменяют физико-механические свойства стружки и загрязняют ее посторонними предметами в виде ветоши, опилок, и т. д.

Наиболее эффективными с этой точки зрения являются скребковые конвейеры.

Скребковые конвейеры, обладая рядом преимуществ, имеют, к сожалению, множество недостатков, а поэтому непрерывно совершенствуются.

Постановка задачи

Анализ существующих в производстве скребковых конвейеров в отечественной и зарубежной литературе за последние 25–30 лет наглядно демонстрирует следующие пути совершенствования, которые производятся по следующим направлениям:

- двухцепные конвейеры;
- одноцепные конвейеры;
- конвейеры с канатным тяговым органом;
- штанга со скребками или тележками;
- рабочий орган транспортирования;
- желоб конвейера.

Все эти направления и совершенствования скребковых конвейеров представлены широкой гаммой авторских свидетельств и патентов (табл.1)

© Тихонцов А.М. Дунаевский Б.Л., 2006

Формулирование целей статьи.

Усовершенствования по двухцепным скребковым конвейерам относятся к креплению скребков на цепях и введению дополнительных планок; шарнирных тяг, направляющих, упругих элементов и т. д. В результате уменьшается износостойкость конвейеров, однако эти усовершенствования усложняют их и лишь в некоторых из них увеличивается производительность.

Работы по одноцепным скребковым конвейерам направлены на усовершенствование крепления скребков, корпуса конвейера; конструкции скребка; введение соединительных элементов, опор и шарниров, гибких бортов и эластичных скребков; дополнительной приводной звездочки; поворотных скребков, направляющих для цепи; направляющих кожухов, поддерживающих роликов для холостой ветви; дополнительных предохранительных круглозвенных цепей, скобок на скребках и звеньях для их соединения. Это увеличивает их надежность и производительность, но в большинстве случаев усложняет конструкцию.

В конвейерах с канатным тяговым органом усовершенствуется крепление скребков к канату; натяжение обратной ветви каната, канат помещается в пазу рабочей плоскости; устанавливаются фасонные бобышки и скользуны; опора со стрелой. Это дает снижение материалоемкости, но увеличивается износ желобов конвейеров.

Поисковыми работами в области применения штанги со скребками достигается усовершенствование транспортных элементов; скребки снабжаются упорами; на боковых стенках желоба устанавливаются рельсы или штыри на стенках для перемещения рабочего органа; в желобе устанавливаются наклонные зубья и клыки; вводятся дуговой желоб и дуговые штанги; толкатели. При этом повышается производительность, но быстро выходят из строя шарнирные скребки и требуются периодические осмотры и ремонты.

Усовершенствования по рабочему органу транспортирования приводят к конструктивному изменению желоба и его направляющих элементов; вводятся гибкие элементы между скребками и дном; эластичные оболочки; звездочки со скошенными выступами для уменьшения износа и полки с перемычками для раздельного транспортирования груза. Конструктивными усовершенствованиями повышается

надежность работы, но усложняется ремонт и эксплуатация конвейеров.

Работы с желобом конвейера направлены на усовершенствование соединения секций; предлагаются желоб фасонного профиля со шлицами; полки, связанные крестовинами. При этом усиливается жесткость става, сводится до минимума просыпание материала, но значительно увеличивается металлоемкость конструкции.

Выводы.

Все перечисленные усовершенствования незначительно увеличивают производительность, в ряде случаев снижают материалоемкость конвейеров, усиливают жесткость, надежность в работе, но все это не обеспечивает осуществления следующих задач:

1. Исключения жесткого контактирования скребков с дном конвейера.
2. Уменьшения износа скребковины дна желоба.

Существенным недостатком является и то, что стружка, перемещаясь вместе с силовым органом, попадая в пространство между желобом и корпусом, изнашивает цепи и другие транспортирующие элементы, корпус или дно конвейера, выводит из строя привод.

Приведенный анализ существующих и рекомендованных конвейеров, позволил разработать перспективное направление развития данных устройств, применительно к перемещению отходов механических цехов.

Основные положения этого перспективного направления изложены в работе (1), суть которых сводится к следующему:

- рабочий транспортирующий орган в виде скребка размещен на специальной тележке, направляющие которой и приводной орган в виде цепей или канатов вынесены из зоны транспортирования стружки.

ЛИТЕРАТУРА

1. 1. Тихонцов А.М. Вспомогательное оборудование механических цехов. Киев: Высшая школа, 1982, – 197 с.

Получено 24.01.2006 г.

№ п/п	Наименование направления	№ патентов и авторских свидетельств по данному направлению	Что усовершенствуется по данному на- правлению	Примечания
1	2	3	4	5
1	Двухцепные конвейеры	Авт. свид. СССР № 349621; 405779; 707861. Патенты США № 3468410. Франции № 7609825. Швейцарии № 551791.	Усовершенствуются крепления скребков на цепях и введение дополнительных планок, шарнирных тяг, направляю- щих, упругих элементов; в загрузочной секции устанавливается конический рассекатель	Конвейеры значительно усложняются, уменьша- ется их износостойкость и лишь в некоторых из них увеличивается про- изводительность
2	Одноцепные конвейеры	Авт. свид. СССР № 191408; 243483; 295723; 379482; 382561; 574372; 621867. Патенты США № 3061073; 3225897; 3430131. Японии № 8854; 50-65107; 53-15595.	Обеспечивается поворот в горизонталь- ной плоскости; усовершенствуется кре- пление скребков, корпуса конвейера; конструкция скребка; вводят соедини- тельные элементы, опоры и шарниры, гибкие борта и эластичные скребки; пе- реходное звено в цепи с выступом для трения; дополнительная приводная звездочка; поворотные скребки; на-	Значительно увеличива- ется надежность и произ- водительность конвейе- ров, но, в большинстве случаев, усложняется конструкция без види- мых для этого причин
1	2	3	4	5
		Англии № 1169171; 1170447; 1242011; 1267349;	направляющие для цепи; дополнительные пластины на цепи; направляющие ко- жухи; поддерживающие ролики для хо-	

		1330042; 1446555. ФРГ № 221907. Франции № 1442046; 1456338. Швейцарии № 584688	лостой ветви; две дополнительные предохранительные круглозвенные цепи; скобки на скребках и звеньях для их соединения	
3	Конвейеры с контактным тяговым органом	Авт. свид. СССР № 606772; 816883. Патенты ФРГ № 2149971. Англии № 4622; 429	Усовершенствуется крепление скребков к канату; натяжение обратной ветви каната; канат помещается в пазу рабочей плоскости; устанавливаются фасонные бобышки и скользуны, опора со стрелой	Снижается материалоемкость конструкции, приводная мощность, но увеличивается износ желоба конвейера
4	Штанга со скребками или тележками	Авт. свид. СССР № 770944. Патенты ГДР № 38480. Японии № 53-15596. США № 4130195; 4082178	Усовершенствуются транспортные элементы, скребки снабжаются упорами; на токовых стенках желоба устанавливаются рельсы или штыри на стенках для перемещения рабочего органа; в желобе устанавливаются наклонные зубья и клыки; вводится другой желоб и дуговые штанги; толкатели выполняются треугольной формы	Значительно повышается производительность, но быстро выходят из строя шарнирные скребки и требуются периодические осмотры и ремонты
1	2	3	4	5
5	Рабочий орган	Авт. свид. СССР	Усовершенствуется желоб и его направ-	Конструктивным усовер-

	транспортирования	№ 694436; 763213; 874515; 846429; 288645; 375388; 414157. Патенты ПНР № 55294. Патенты США № 4238028. Патенты Швейцарии № 7660/75. Патенты ФРГ № 1273410	ляющие элементы; вводятся гибкие элементы между скребками и дном; полированные кулаки; эластичные оболочки; звездочки со скошенными выступами для уменьшения износа и полки с перемычками для отдельного транспортирования груза	шенствованием повышается надежность работы, но усложняется ремонт и эксплуатация
6	Желоб конвейера	Патенты Японии № 11,98; 55-22364. Патенты ФРГ № 2048093. Патенты Англии № 1327752. Патенты Франции № 1480874	Усовершенствуется соединение секций, предлагается желоб фасонного профиля в желобе вводятся шлицы; силовые борта; полки, связанные крестовинами	Усиливается жесткость става, сводится до минимума просыпание материала, но значительно увеличивается металлоемкость конструкции

ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУКСИРОВЩИКОВ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Введение. Доставка вышедших из строя самосвалов с места поломки на поверхность карьеров и далее к месту стационарных ремонтных мастерских в принципе может осуществляться тремя способами: буксирование на гибкой сцепке, буксирование на жесткой сцепке, буксирование с помощью специально оборудованного автомобиля-буксировщика. В условиях карьеров случаются поломки, когда машина не может перемещаться на своем ходу, встает вопрос о ее доставке при отрыве передних или задних колесных опор от дороги. Такой способ доставки может быть осуществлен только с помощью автомобилей-буксировщиков, является исключительно мобильным, производительным, не требует размещения водителя в буксируемой машине, широко применяется в мировой практике. Такая схема буксирования конструктивно проста, достаточно автономна. Вместе с тем требует дополнительных исследований по формированию внешних нагрузок на подъемно-сцепное устройство и динамике системы "буксировщик - автосамосвал" для научно-обоснованного подхода к проектированию и конструированию основных силовых элементов несущей конструкции.

1. Обзор методов проектирования буксировщиков карьерных автосамосвалов. На Украине буксировщики карьерных автосамосвалов проектируются в ОАО "Транспрогресс" (г. Мариуполь), в России проектируются и изготавливаются на Белгородском авторемонтном заводе "Авторемгормаш". Автомобили-буксировщики проектируются на базе серийно выпускаемых автосамосвалов БелАЗ путем установки подъемно-сцепного устройства, приспособленного для захвата спереди и сзади буксируемых автосамосвалов. Конструкция подъемно-сцепного устройства состоит из неподвижной рамно-ферменной несущей конструкции, которая крепится к раме серийного автосамосвала, и подвижной штанги, которая имеет два узла, рассчитанных для захвата спереди и сзади. Параметры основных силовых элементов подъемно-сцепных устройств определяются из расчета на статическую прочность, при этом не учитывается ряд составляющих внешней

© Бейгул В.О., Лепетова А.Л., Ширин Л.Н., 2005

нагрузки, не учитываются динамические эффекты, связанные с колебаниями системы "буксировщик-автосамосвал" при движении по неровностям технологических дорог.

2. Обзор работ, посвященных исследованию динамики спецавтотранспорта. Динамике двухзвенных колесных машин посвящен ряд работ, в том числе в работах Веселова Г.П., Густомясова А.Н., Колмакова В.И. [1], [2] исследуются колебания системы "тягач-прицеп" при движении по неровностям дорог, изучаются упругодемпфирующие связи. Динамической устойчивостью занимаются Лобас Л.Г., Ващенко Ю.Л. Известны их работы для двухзвенных автопоездов [3], [4]. Следует попутно отметить, что особую актуальность эти работы имеют в области магистральных автопоездов. В системе "тягач-прицеп" в некоторых случаях могут возникать автоколебания, раскрывают механизм возникновения таковых Бусаров Ю.П., Черкунов В.Б., Татарченко А.Е. в известной работе [5]. Авторы убедительно показывают, как можно избежать появления автоколебаний конструктивными мероприятиями. Большой пласт занимают работы, посвященные исследованию характеристик шин как упругих элементов. Это диссертационные работы Князькова В.Н. [6], Митекина П.И. [7], Нанадзе Г.Н. [8], Рязановского А.Р. [9], где изучаются радиальная и боковая жесткости, поглощающая способность шин при колебаниях.

Значительное место в колебаниях автомобилей занимают кинематические возмущения, которые реализуются неровностями дорог. Изучением статистических характеристик микропрофиля дорог занимались Афанасьев В.Л., Хачатуров А.А., результаты изложены в работе [10]. Барахтанов Л.В. в диссертационной работе [11] исследовал статистические характеристики микропрофиля пересеченной местности в тесной связи с колебаниями вездеходных машин. Бейгул О.А. в книгах [12] и [13] приводит результаты статистического исследования микропрофиля технологических дорог в условиях металлургических предприятий, при исследовании динамики платформ на пневмоколесном ходу использует среднестатистические характеристики неровностей для аппроксимирующих функций. Васильев В.С. в диссертации [14] решает задачу о связи неровностей поверхности дороги с колебаниями автомобиля. В динамику автомобиля большой вклад внес Певзнер Я.М. В работе [15] он комплексно подходит к исследованию колебаний автомобиля, где самостоятельно проводились статистиче-

ские исследования. Значительное место в исследовании дорожных условий занимают работы Фаробина Я.Е., Юрчевского А.А., Аксенова С.В., где они вводят классификацию дорог по степени влияния на обобщенные показатели тягово-скоростных свойств автотранспортных средств. Некоторые результаты представлены в работе [16]. Исследованию динамики автомобиля посвящены работы [17]–[19].

3. Обзор исследований в области конструктивного совершенствования спецавтотранспорта. Главным критерием конструктивного совершенства спецавтотранспорта является его металлоемкость. Безверхий С.Ф., Белокуров В.Н., Самойлов Г.А. значительный вклад внесли в экспериментальные методы снижения металлоемкости автомобилей [20]. Красной нитью работ Бейгула О.А. проходит снижение металлоемкости спецавтотранспорта [12], [13]. Белокуров В.Н. в своих работах значительное место посвящает снижению нагруженности несущей системы автомобиля путем оптимизации угловых жесткостей шин и подвески [21], намечает пути снижения металлоемкости рам грузовых автомобилей [22]. Волохов Г.М. работает в области повышения прочности соединений продольных и поперечных элементов автомобильных рам [23], тесно связывает повышение прочности с уменьшением металлоемкости несущих систем автомобилей [24]. Выгонный А.Г. предлагает критерии выбора жесткости подвески автомобиля [25]. Конструктивное совершенство прицепов тесно связывает с долговечностью и снижением металлоемкости Горин Э.А. в работе [26]. Повышением долговечности несущих систем карьерных автосамосвалов занимаются Григолюк Э.И., Сухомлинов А.Г., Барышников Ю.Н. [27]. Резниченко В.А., Наркевич Э.И., Киселев Н.С. занимаются изучением эксплуатационных свойств спецавтотранспорта [28].

Ряд авторов совершенствование конструкций связывают с точным знанием нагрузок, которые приходят на основные несущие элементы спецавтотранспорта. Так Степанов Е.Ф., Сливинский В.И., Троицкий В.Т. предлагают тензометрическое опорно-сцепное устройство [29]. Фасхиев Х.А. Павленко П.Д. предлагают делать прочностную доводку конструкций на пути снижения металлоемкости и увеличения долговечности [30]. Ряд работ посвящен оптимизации несущих систем по критерию минимальной металлоемкости. Это работы [31], [32], [33].

Заключение. Из приведенного выше анализа следует, что в настоящее время проектирование буксировщиков карьерных автосамосвалов не учитывает ряд режимов нагружения и приводит к перетяжелению конструкций, в научной литературе отсутствуют материалы, посвященные разработке и исследованию автомобилей-буксировщиков при очевидной актуальности таких машин для открытых горных работ, где широко применяются карьерные автосамосвалы. Приведенный обзор показал, в каком направлении следует работать на пути создания автомобилей-буксировщиков, учитывая, что даже в общем автомобилестроении нет единого и научно-обоснованного подхода к проектированию несущих систем.

В связи с этим можно выделить следующие проблемы выбора рациональных параметров буксировщиков карьерных автосамосвалов: 1. Разработка математической модели формирования расчетных нагрузок, действующих на подъемно-сцепное устройство. 2. Исследование динамики системы "буксировщик-автосамосвал". 3. Экспериментальное исследование процесса формирования расчетных нагрузок на подъемно-сцепное устройство автомобиля-буксировщика. 4. Разработка научно-обоснованной инженерной методики проектирования буксировщиков карьерных автосамосвалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселов Г.П., Густомясов А.Н., Колмаков В.И. Аналитическое исследование колебаний системы тягач-прицеп // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №5. – С. 92–97.
2. Веселов Г.П., Густомясов А.Н., Колмаков В.И. Колебания системы тягач-прицеп с межсекционной угловой упругодемпфирующей связью // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №2. – С. 107–111.
3. Лобас Л.Г. Курсовая устойчивость двухзвенных колесных машин // Прикладная механика. – 1989. – Т.25. – №4. – С. 104–111.
4. Лобас Л.Г., Ващенко Ю.Л. Динамическое поведение двухзвенного автопоезда вблизи границы области устойчивости // Прикладная механика – 1991. – Т.27. – №12. – с. 85–91.
5. Бусаров Ю.П., Черкунов В.Б., Татарченко А.Е. Подавление автоколебаний прицепа // Автомобильная промышленность. – 1986. – №10. – С. 17–19.

6. Князьков В.Н. Исследование жесткости и кинематических параметров автомобильной шины. – Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1979 – 220 с.
7. Митекин П.И. Исследование поглощающей и сглаживающей способности шины при колебаниях грузового автомобиля. – Дис. ...канд. техн. наук. – М., 1974. – 154 с.
8. Нанадзе Г.Н. Исследование поглощающей способности шины при вертикальных колебаниях автомобиля. – Дис....канд. техн. наук. – М., 1977. – 178 с.
9. Рязановский А.Р. Исследование колебаний шин автомобиля. – Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1978. – 157 с.
10. Афанасьев В.Л., Хачатуров А.А. Статистические характеристики микропрофиля автомобильных дорог и колебания автомобиля // Автомобильная промышленность. – 1966. – №2. – С. 23–27.
11. Барахтанов Л.В. Исследование статистических характеристик микропрофиля пересеченной местности и колебаний корпуса вездеходных машин. – Дис. ... канд. техн. наук. – Горький, 1972. – 216 с.
12. Бейгул О.А. Динамика и прочность самоходных платформ на пневмоколесном ходу. – Киев: ИСМО МО Украины, 1996. – 138 с.
13. Бейгул О.А. Основы проектирования и расчеты на прочность металлургических платформ. – Киев: ИСМО МО Украины, 1997. – 277 с.
14. Васильев В.С. Статистическое исследование ровности дорожной поверхности и колебаний автомобиля. – Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1970. – 208 с.
15. Колебания автомобиля. Испытания и исследования / Под ред. Я.М. Певзнера. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
16. Фаробин Я.Е., Юрчевский А.А., Аксенов С.В. Классификация дорожных условий по степени влияния на обобщенные показатели тягово-скоростных свойств и топливной экономичности автотранспортных средств // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №5. – С. 91–94.
17. Engels F. Vibrations in vehicles and methods of investigating them. In: Instrumentation and test techniques for motor vehicles. – Cranfield, 1976. – P.15.

- 18.Schedl R., Stribersky A., Troger H., Zeman K. Driving behavior of a tractor-semitrailer vehicle in steady state downhill motion // Vehicle Syst. Dyn. – 1985. – 14, №1–3. – P. 184–188.
- 19.Troger H., Zeman K. A nonlinear analysis of genetic types of loss of stability of the steady state motion of a tractor-semitrailer // Vehicle Syst. Dyn. – 1984. – 13, №4. – P. 161–172.
- 20.Безверхий С.Ф., Белокуров В.Н., Самойлов Г.А. Эффективность экспериментальных исследований и снижение металлоемкости автомобилей // Автомобильная промышленность. – 1983. – №9. – С. 10–11.
- 21.Белокуров В.Н. Снижение нагруженности несущей системы грузового автомобиля путем оптимизации соотношения угловых жесткостей рамы и подвески // Автомобильная промышленность. – 1983. – №6. – С. 13–16.
- 22.Белокуров В.Н. Пути снижения металлоемкости рам грузовых автомобилей // Автомобильная промышленность. – 1983. – №5. – С. 15–18.
- 23.Волохов Г.М. Повышение прочности соединений поперечных и продольных элементов автомобильных рам // Автомобильная промышленность. – 1984. – №11. – С. 12–13.
- 24.Волохов Г.М., Павленко П.Д., Петер Ю.Н. Эффективный метод повышения прочности и снижения металлоемкости несущих систем автомобилей // Автомобильная промышленность. – 1985. – №2. – С. 12–13.
- 25.Выгонный А.Г. Выбор условий жесткости подвески автомобиля // Автомобилестроение. Теория и конструирование. – Минск, 1984. – Вып.19. – С. 51–55.
- 26.Горин Э.А. Опыт повышения долговечности и снижения металлоемкости прицепов // Автомобильная промышленность. – 1994. – №12. – С. 5–7.
- 27.Григолюк Э.И., Сухомлинов А.Г., Барышников Ю.Н. Повышение долговечности несущих систем автомобилей-самосвалов особо большой грузоподъемности // Автомобильная промышленность. – 1986. – №8. – С. 15–16.
- 28.Резниченко В.А., Наркевич Э.И., Киселев Н.С. Эксплуатационные свойства некоторых седельных тягачей // Автомобильная промышленность. – 1986. – №4. – С. 16–18.

29. Степанов Е.Ф., Сливинский В.И., Троицкий В.Т. Тензометрическое опорно-сцепное устройство // Автомобильная промышленность. – 1987. – №4. – С. 38–39.
30. Фасхиев Х.А., Павленко П.Д. О прочностной доводке конструкций // Автомобильная промышленность. – 1995. – №2. – С. 15–17.
31. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции: Пер. с англ. / Пер. В.М. Картвелишвили, А.А. Меликян. Под ред. Н.В. Баничука. – М.: Мир, 1983. – 479 с.
32. Van Deusen B.D. Truck Suspension System Optimization. – Journal of Terra-mechanics, 1974, vol. 9, №2. – P. 83–100.
33. Venkaya V.B. Structural optimization; a review and some recommendations // Int. J. for Num Methods in Engineering. V. 13. №2. 1978.

Получено 12.03.2006 г.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КАРЬЕРНЫМ АВТОТРАНСПОРТОМ

Введение

Оперативно-диспетчерское управление карьерным автотранспортом связано с решением нескольких функциональных задач, а именно - задачей управления грузопотоками, задачей динамической маршрутизации транспортных средств, задачей комплексной оценки эффективности функционирования транспортно-технологического комплекса (ТТК) [1]. Существующие системы [2, 3] обеспечивают диспетчера ТТК большим количеством данных по параметрам движения автосамосвалов и работе экскаваторов, но не решают задач автоматизированного регулирования грузопотоков в реальном времени и динамической маршрутизации автосамосвалов с учетом меняющейся обстановки, требований ритмичности поставок и минимизации потерь от простоев и холостых пробегов.

Для эффективного решения указанных задач необходимо разработать адекватные математические модели, позволяющие, с одной стороны, отслеживать в формализованном виде процессы, происходящие в ТТК, а, с другой стороны, - корректировать задания и вычислять оптимальные управляющие воздействия.

На уровне оперативно-диспетчерского управления ТТК можно выделить две основные функциональные задачи: регулирование грузопотоков и динамическая маршрутизация транспортных средств (ТС).

В данной работе разработаны математические модели решения указанных задач, которые входят в комплекс математических моделей автоматизированной системы оперативно диспетчерского управления (АСОДУ) ТТК карьера [5, 6].

Математическая модель задачи регулирования грузопотоков

Задачей верхнего уровня в АСОДУ является регулирование грузопотоков, идущих от экскаваторов на пункты разгрузки. Цель решения задачи - оперативное перепланирование для стабилизации

© Левыкин В.М., Шевченко И.В., 2006

заданного объёма и качества рудного потока при изменении режима функционирования ТТК и минимизация затрат на транспортирование.

Постановка задачи заключается в следующем. Имеется n объектов погрузки (ОП) и m объектов разгрузки (ОР). Каждому из ОП установлен план отгрузки груза на смену q_{nli} ($i=1..n$) и качественный показатель содержания металла в руде α_i , а каждому из ОР – план приема груза Q_{nli} ($j=1..m$), причем, если объектом разгрузки является обогатительная фабрика или перегрузочный пункт, то план предусматривает смешение грузов для обеспечения среднего показателем качества $\alpha_j^{(k)}$, который может оставаться неизменным на всё время смены или изменяться k раз в течение смены.

Рассмотрим модель задачи применительно к случаю смешения грузов на приемных воронках фабрики. Остальные варианты (отгрузка на промежуточные склады, дробилки щебня, отвалы) являются частными случаями данной задачи.

При условии поддержания ритмичного процесса погрузки, перевозки и разгрузки основные соотношения между параметрами материальных потоков с учетом смешения грузов на j -м объекте будут следующие.

Количество потребления груза j -м объектом с i -го объекта за интервал времени t_k определяется выражением вида:

$$q_{ij}^{(k)} = U_{ij}^{(k)} Q_j^{(k)} \quad (1)$$

где $U_{ij}^{(k)}$ – коэффициент смешения по режиму k для потока с i -го объекта, $U_{ij} < 1$; $Q_j^{(k)}$ – количество переработанного груза на j -том объекте за время t_k , причем

$$Q_j^{(k)} = \sum_{i=1}^n q_{ij}^{(k)}. \quad (2)$$

На величину $Q_j^{(k)}$ наложено ограничение вида

$$Q_{jn}^{(k)} < Q_j^{(k)} < Q_{jв}^{(k)}, \quad (3)$$

где индекс «н» определяет нижнее, а «в» - верхнее значение переменной.

Суммарное количество реально отправленного груза с i -го объекта ОП всем объектам разгрузки за время t_k , рассчитывается по выражению:

$$q_i^{*(k)} = \sum_{j=1}^m q_{ij}^{(k)} \quad (4)$$

Управление смещением грузов на j -м ОР будет осуществляться управляющими воздействиями U_{ij} , множество которых задано с помощью системы ограничений вида

$$U_{ijn}^{(k)} \leq U_{ij}^{(k)} \leq U_{ije}^{(k)}, \sum_{i=1}^n U_{ij}^{(k)} = 1. \quad (5)$$

Допустим, что зависимость усреднённого качественного показателя выходного потока j -го объекта $\alpha_{0j}^{(k)}$ от показателей α_i и управляющих воздействий $U_{ij}^{(k)}$ является линейной:

$$\alpha_{0j}^{(k)} = \sum_{i=1}^n U_{ij}^{(k)} \alpha_i^{(k)}. \quad (6)$$

По условиям технологического режима на переменную $\alpha_{0j}^{(k)}$ наложено ограничение вида

$$\alpha_{0jn}^{(k)} \leq \alpha_{0j}^{(k)} \leq \alpha_{0je}^{(k)} \quad (7)$$

и на основании уравнения (4) введем ограничения, выражающие баланс потока, исходящего от объекта погрузки с индексом i :

$$\sum_{j=1}^m q_{ij}^{(k)} \leq q_{ie}^{*(k)} \quad (8)$$

Поскольку при планировании грузопотоков на следующий период t_k мы не можем непосредственно влиять на ритмичность поступления грузов, а, следовательно, и на «мгновенные» значения качества α_0 , то в качестве функции цели примем не максимум прибыли от реализации продукции [2], а условную себестоимость перевозки:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij}^{(k)} S_{ij}, \quad (9)$$

где q_{ij} – объём перевозок по маршруту ij ; S_{ij} – расстояние пробега от i -го экскаватора до j -го объекта разгрузки.

Тогда задача оптимизации грузопотока для транспортно-технологического комплекса формулируется как выбор объёмов транспортировки $q_{ij}^{(k)} = U_{ij}^{(k)} Q_j^{(k)}$ с каждого ОП_i на каждый ОР_j, таких, что:

выполняется план приёма груза для каждого ОР_j :

$$Q_{nл j}^{\min} \leq \sum_i q_{ij} \leq Q_{nл j}^{\max}; \quad (10)$$

не превышает план отгрузки продукта для каждого ОП_i

$$\sum_{j=1}^m q_{ij}^{(k)} \leq q_{iв}^{*(k)}; \quad (11)$$

соблюдается требуемый коэффициент смешения продукта для каждого ОР_j

$$\alpha_{ср j н} \leq \frac{\sum_i (\alpha_i * q_{ij})}{\sum_i q_{ij}} \leq \alpha_{ср j в}; \quad (12)$$

минимизируются транспортные расходы

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij}^{(k)} S_{ij} \rightarrow \min. \quad (13)$$

соблюдаются ограничения по знаку переменных:

$$U_{ij} \geq 0, \quad (14)$$

где $i=1..n$; $j=1..m$; $k=1..s$.

Сформулированная задача условной оптимизации представляет собой задачу математического программирования с нелинейными ограничениями. Задача является мультимодальной и применять градиентные методы невозможно из-за риска попадания в локальный экстремум. Учитывая приоритетность плана грузопотоков для приёмных воронок обогатительной фабрики и перегрузочных площадок, производится ранжирование объектов разгрузки. При решении данной задачи используется эвристический алгоритм, позволяющий при необходимости быстро перепланировать грузопотоки в любой момент времени.

Математическая модель динамической маршрутизации

$$S = \langle X, T, U, Y, \varphi, \eta \rangle, \quad (15)$$

где X – пространство состояний системы; T – множество моментов времени; U – множество значений управляющих воздействий (распределение транспортных средств по маршрутам в течение временного интервала T); Y – множество значений выходных величин; $\varphi : T \times X \rightarrow X$ – переходная функция состояния (определяет изменение оперативного положения на транспортной сети в любой момент времени из множества T); $\eta : T \times X \rightarrow Y$ – выходное отображение, определяющее динамику выходных величин (определяет значение затрат на транспортирование и результаты транспортирования в любой момент времени из множества T).

Рассмотрим пространство состояний системы - X , которое состоит из параметров состояния транспортных средств, параметров состояния объектов погрузки и параметров состояния объектов разгрузки:

$$X = \langle X_{TC\gamma}, X_{OPi}, X_{OPj} \rangle. \quad (16)$$

Состояние транспортного средства γ определяется вектором:

$$X_{TC\gamma} = (x_{\gamma}^{TC}, OP_{\gamma}^{TC}, OP_{\gamma}^{TC}, q_{\gamma}^{TC}, t_{\gamma}^{TC}),$$

где x_{γ}^{TC} – переменная, характеризующая состояние данного ТС, со следующими допустимыми значениями: «СП» – следование на погрузку, «ОП» – ожидание погрузки, «П» – погрузка, «СР» – следование на разгрузку, «ОР» – ожидание разгрузки, «Р» – разгрузка, «Н» – неисправно; OP_{γ}^{TC} – номер объекта погрузки, к которому следует данный ТС (когда он находится в состоянии «СП», «ОП» или «П»); OP_{γ}^{TC} – номер объекта разгрузки, к которому следует данный ТС (когда он находится в состоянии «СР», «ОР» или «Р»); q_{γ}^{TC} – количество тонн груза, которое в данный момент перевозится ТС (когда он находится в состоянии «СР», «ОР» или «Р»); t_{γ}^{TC} – время последнего изменения состояния данного ТС.

Длину маршрута между ОП и ОР, по которому движется ТС γ , будем обозначать $S(OP_{\gamma}^{TC}, OP_{\gamma}^{TC})$. Учитывая, что скорость движения ТС

колеблется в определенных пределах, введём функцию $T^\gamma(\gamma, i, j)$, которая определяет время движения ТС γ по маршруту между ОП $_i$ и ОР $_j$.

Состояние объекта погрузки ОП $_i$ определяется следующими параметрами: $X_{ОП_i} = (x_i^{ОП}, N_i^{ОП}, t_i^{ОП})$, где $x_i^{ОП}$ - переменная оценки состояния данного ОП, со следующими допустимыми значениями: «И» – исправен, «Н» - неисправен; $N_i^{ОП}$ - количество ТС с состояниями «СП», «ОП» или «П», направленных в данный момент к ОП $_i$; $t_i^{ОП}$ - время последнего ухода загруженного ТС с ОП $_i$ (для расчета ритмичности).

Состояние объекта разгрузки ОР $_j$ определяется следующими параметрами: $X_{ОР_j} = (x_j^{ОР}, N_j^{ОР}, q_{ij}^{ОР}, t_j^{ОР})$, где $x_j^{ОР}$ - переменная оценки состояния данного ОР, со следующими допустимыми значениями: «И» – исправен, «Н» - неисправен; $N_j^{ОР}$ - количество ТС с состояниями «СР», «ОР» или «Р», направленных в данный момент к ОР $_j$; $q_{ij}^{ОР}$ - количество груза, доставленного с начала смены с ОП $_i$ на ОР $_j$; $t_j^{ОР}$ - время последнего прибытия загруженного ТС на ОР $_j$ (для расчета ритмичности).

Для обеспечения возможности алгоритмизации решения задачи разделим множества ОП, ОР и ТС на несколько подмножеств по организационным и функциональным признакам. Здесь и далее предполагается, что I – множество индексов ОП, J – множество индексов ОР, G – множество индексов ТС.

$ОП^j = \{ОП_d \mid d \in I, q_{dj} > 0\}$ - множество ОП, с которых предусмотрена транспортировка груза на объект разгрузки ОР $_j$, в соответствии с планом оптимизации грузопотока.

$ОР^i = \{ОР_r \mid r \in J, q_{ri} > 0\}$ - множество ОР, на которые предусмотрена транспортировка груза с объекта погрузки ОП $_i$, в соответствии с планом оптимизации грузопотока.

$ТС^i = \{ТС^a \mid a \in I, ОП_\gamma^{ТС} = i, x_\gamma^{ТС} = "СП", \gamma \in G\}$ - множество ТС, которые направляются в данный момент на объект погрузки ОП $_i$.

$TC^j = \{TC^b \mid b \in J, OP_\gamma^{TC} = j, x_\gamma^{TC} = "CP", \gamma \in G\}$ - множество ТС, которые направляются в данный момент на объект разгрузки OP_j .

$TC_{OP} = \{TC_l \mid l \in G, x_l^{TC} \in \{"OP", "П"\}\}$ - множество ТС, которые находятся под погрузкой или ожидают погрузки.

$TC_{OP} = \{TC_u \mid u \in G, x_u^{TC} \in \{"OP", "P"\}\}$ - множество ТС, которые находятся под разгрузкой или ожидают разгрузки;

$TC_{OP}^i = \{TC_{OP}^l \mid l \in I, OP_l^{TC} = i, x_\gamma^{TC} \in \{"OP", "П"\}, \gamma \in G\}$ - множество ТС, которые находятся под погрузкой или ожидают погрузки на OP_i .

$TC_{OP}^j = \{TC_{OP}^u \mid u \in J, OP_\gamma^{TC} = j, x_\gamma^{TC} \in \{"OP", "P"\}, \gamma \in G\}$ - множество ТС, которые находятся под разгрузкой или ожидают разгрузки на OP_j .***до сих

Для конкретизации отображения $\varphi: T \times X \rightarrow X$ введем функции переходов, каждая из которых определяет изменение состояния автоматной модели после определённого события в ТТК.

После того, как TC_γ начал движение на погрузку к OP_i , состояния TC_γ и OP_i изменяются следующим образом:

$$X_{TC_\gamma}(t) = ("СП", i, OP_\gamma^{TC}(t-1), 0, t), \quad (17)$$

$$X_{OP_i}(t) = ("И", N_i^{OP}(t-1) + 1, t_i^{OP}(t-1)); \quad (18)$$

После того, как TC_γ прибыл на погрузку к OP_i и стал в очередь, состояние TC_γ изменяется следующим образом:

$$X_{TC_\gamma}(t) = ("OP", i, OP_\gamma^{TC}(t-1), 0, t); \quad (19)$$

После того, как была начата погрузка TC_γ на объекте погрузки OP_i , состояние TC_γ изменяется следующим образом:

$$X_{TC_\gamma}(t) = ("П", i, OP_\gamma^{TC}(t-1), 0, t); \quad (20)$$

После того, как TC_γ начал движение от OP_i на разгрузку к OP_j с грузом q тонн, состояния TC_γ , OP_i и OP_j изменяются следующим образом:

$$X_{TC\gamma}(t) = ("CP", OP_{\gamma}^{TC}(t-1), j, q, t), \quad (21)$$

$$X_{OPi}(t) = ("И", N_i^{OP}(t-1) - 1, t), \quad (22)$$

$$X_{OPj}(t) = ("И", N_j^{OP}(t-1) + 1, q_{ij}^{OP}(t-1), t_j^{OP}(t-1)). \quad (23)$$

После того, как ТС γ прибыл на разгрузку к ОР $_j$ и стал в очередь, состояние ТС γ изменяется следующим образом:

$$X_{TC\gamma}(t) = ("OP", OP_{\gamma}^{TC}(t-1), j, q, t); \quad (24)$$

После того, как была начата разгрузка ТС γ на объекте разгрузки ОР $_j$, состояние ТС γ изменяется следующим образом:

$$X_{TC\gamma}(t) = ("P", OP_{\gamma}^{TC}(t-1), j, q, t); \quad (25)$$

После того, как была окончена разгрузка ТС γ на объекте разгрузки ОР $_j$, данный ТС должен быть отправлен на объект погрузки ОП $_i$. Состояния ТС γ , ОП $_i$ и ОР $_j$ изменяются следующим образом:

$$X_{TC\gamma}(t) = ("СП", i, OP_{\gamma}^{TC}(t-1), 0, t); \quad (26)$$

$$X_{OPj}(t) = ("И", N_j^{OP}(t-1) - 1, q_{ij}^{OP}(t-1) + q, t); \quad (27)$$

$$X_{OPi}(t) = ("И", N_i^{OP}(t-1) + 1, t_i^{OP}(t-1)). \quad (28)$$

После того, как была обнаружена неисправность на объекте погрузки ОП $_i$, его состояние изменяется следующим образом:

$$X_{OPi}(t) = ("H", N_i^{OP}(t-1), t_i^{OP}(t-1)); \quad (29)$$

После того, как была обнаружена неисправность на объекте разгрузки ОР $_j$, его состояние изменяется следующим образом:

$$X_{OPj}(t) = ("H", N_j^{OP}(t-1), q_{ij}^{OP}(t-1), t_j^{OP}(t-1)); \quad (30)$$

После того, как была обнаружена неисправность транспортного средства ТС γ , его состояние изменяется следующим образом:

$$X_{TC\gamma}(t) = ("H", OP_{\gamma}^{TC}(t-1), OP_{\gamma}^{TC}(t-1), q_{\gamma}^{TC}(t-1), t_{\gamma}^{TC}(t-1)). \quad (31)$$

Множество управляющих воздействий

Управляющими воздействиями в данной задаче являются назначения ТС на маршруты. Поскольку нет смысла рассчитывать оптимальные маршруты для тех ТС, которые находятся в движении по уже назначенным маршрутам, условимся считать управляющими воздействиями предполагаемые маршруты для тех ТС, которые вскоре освободятся (такowymi считаются ТС, которые стоят в очереди на погрузку, загружаются, стоят в очереди на разгрузку или разгружаются, т.е. ТС попадающие во множества $\bigcup_{i \in I} TC_{OP}^i$ и $\bigcup_{j \in J} TC_{OP}^j$).

Для каждого ТС, которое стоит в очереди на погрузку либо уже загружается, АСОДУ должна обеспечить выбор объекта разгрузки, к которому нужно направить данное ТС. Поэтому управляющим воздействием для данного ТС будет параметр его состояния OP_{γ}^{TC} . Множество управляющих воздействий U_{OP} для всех ТС, которые входят во множество $\bigcup_{i \in I} TC_{OP}^i$, определим, как

$$U_{OP} = \left\{ OP_{\gamma}^{TC} \in J \mid \gamma \in \bigcup_i TC_{OP}^i \right\}. \quad (32)$$

Аналогичным образом, для каждого ТС которое стоит в очереди на разгрузку либо уже разгружается, АСОДУ должна обеспечить выбор оптимального объекта погрузки, к которому нужно направить данное ТС. Управляющим воздействием для такого ТС будет параметр его состояния OP_{γ}^{TC} , и множество управляющих воздействий U_{OP} для всех ТС, которые входят во множество $\bigcup_{j \in J} TC_{OP}^j$ определим, как

$$U_{OP} = \left\{ OP_{\gamma}^{TC} \in I \mid \gamma \in \bigcup_j TC_{OP}^j \right\}. \quad (33)$$

Таким образом, множество управляющих воздействий АСОДУ можно представить как кортеж $U = \langle U_{OP}, U_{OP} \rangle$.

Далее необходимо сформулировать критерии оптимальности решения задачи маршрутизации.

Для получения обобщенной оценки качества управления, которое достигается при использовании АСОДУ, необходимо использовать

комплексный критерий, включающий оценку соблюдения коэффициента смешения, времени простоя экскаваторов и ТС, суммарного пробега ТС, и ритмичности доставки груза. Однако такой критерий неприменим для динамического управления ТТК, поскольку он опирается на историю процесса, в то время как для динамического управления требуется просчитать и оценить ситуацию на ближайший период.

Введём также понятие «предполагаемый коэффициент смешения» для ОР как коэффициент смешения руды, который рассчитывается с учётом уже доставленного на данный ОР груза, и груза, который находится в транспортировке. Предполагаемый коэффициент смешения для OP_j можно найти следующим образом:

$$\alpha_j^{PP} = \frac{\sum_{i \in I} \alpha_i * q_{ij}^{OP} + \sum_{\gamma \in TC^j \cup TC_{OP}^j} \alpha_{OP_\gamma^{TC}} * q_\gamma^{TC}}{\sum_{i \in I} q_{ij}^{OP} + \sum_{\gamma \in TC^j \cup TC_{OP}^j} q_\gamma^{TC}}. \quad (34)$$

Для того, чтобы обеспечить ритмичности поступления груза на объекты разгрузки, необходимо, прежде всего, определить предстоящий интервал времени, на котором уже задано распределение ТС по маршрутам, и количество груза, которое будет перевезено с каждого ОП на каждый ОР за этот интервал.

Вначале определим максимальное запланированное время прибытия на ОР для всех ТС, которые на данный момент находятся под погрузкой:

$$T^{PP} = \max_{\gamma \in TC_{OП}} (t^0 + T^\gamma(\gamma, OP_\gamma^{TC}, OP_\gamma^{TC})), \quad (35)$$

где t^0 - время, прошедшее с начала смены.

Множество ТС, которые движутся к заданному OP_j (или уже стоят в очереди на разгрузку на OP_j) с заданного OP_i обозначим TC_{OP}^{ij} :

$$TC_{OP}^{ij} = \left\{ TC_{OP}^{ij} \mid OP_\gamma^{TC} = j, OP_\gamma^{TC} = i, x_\gamma^{TC} \in \{ "ОП", "П" \}, \gamma \in G \right\} \quad (36)$$

Тогда количество груза, которое будет доставлено с OP_i на OP_j при текущем плане распределения ТС по маршрутам на момент времени T^{PP} можно выразить следующим образом:

$$Q_{ij}^{PP} = q_{ij}^{OP} + \sum_{\gamma \in TC_{OP}^{ij}} q_{\gamma}^{TC}. \quad (37)$$

Опираясь на рассмотренные конструкции, можно ввести несколько критериев динамического управления:

критерий минимизации отклонения от заданного показателя качества руды

$$W_{\alpha}^D = \sum_{j \in J} |\alpha_0 - \alpha_j^{PP}| \rightarrow \min, \quad (38)$$

- минимизирует разницу между плановым коэффициентом смешения α_0 для всех ОР, и предполагаемым коэффициентом смешения для всех ОР, при условии выполнения текущего плана распределения ТС по маршрутам;

критерий условных транспортных расходов

$$W_S^D = \sum_{\gamma \in TC_{OP} \cup TC_{OP}} \frac{S(OP_{\gamma}^{TS}, OP_{\gamma}^{TS})}{\max_{i,j} S_{ij}} \rightarrow \min, \quad (39)$$

- минимизирует длину маршрутов, которые планируется назначить ТС, находящимся в данный момент под погрузкой или разгрузкой (относительно максимальной длины маршрута в ТТК).

критерий ритмичности, - считая, что график отгрузки и потребления груза от i -го ОП j -м ОР является линейным от времени, можно ввести следующим образом:

$$W_R^D = \sum_i \sum_j \left(\frac{q_{ij} \cdot T^{PP}}{T^C} - Q_{ij}^{PP} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (40)$$

где T^C - длительность смены.

Для обеспечения гибкости системы оперативно-диспетчерского управления, оператор должен иметь возможность выбирать наиболее приемлемый критерий динамического планирования, в зависимости от текущей ситуации.

Оптимизация управления ТТК производится путём выбора такого плана распределения ТС по маршрутам, для которого значение выбранного критерия минимально.

Выводы

Разработаны математические модели задач автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления работой карьерного автотранспорта, которые отличаются от существующих повышенной адекватностью описания пространства состояний ТТК и гибкостью выбора критериев оптимизации. Модели позволяют осуществлять быстрое перепланирование грузопотоков и оптимизировать распределение транспортных средств по маршрутам.

Разработанные модели входят в комплекс математических моделей автоматизированной системы оперативно диспетчерского управления (АСОДУ) ТТК карьера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модель автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления карьерным автотранспортом //В.М Левыкин, И.В. Шевченко// Нові технології. 2005. - № 4(10). с.68-72.
2. Легостаев В.Г. Разработка и исследование методов эффективного управления транспортно-технологическими комплексами с использованием информационно-управляющих систем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Харьков. 1979 г.
3. АСУ горнотранспортными работами ГОКа «Эрдэнэт». Г. Маматов, В.А. Коннов. Механизация и автоматизация производства. № 11, 1991. с. 39-42.
4. Автоматизированная система слежения на основе спутниковой навигации. Диспетчеризация мобильного оборудования карьера. Техническое описание. НВК «ВИСТ». М.: 2001 г.
5. Маршрутизация и контроль движения технологических транспортных средств /В.М. Левыкин, И.В. Шевченко// Нові технології. 2004.- № 2(5) с. 182-187.
6. Имитационная модель функционирования карьерного автотранспорта /В.М Левыкин, И.В. Шевченко// Нові технології. 2004. - № 3(6). с.91-97.

О ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛИ КОМПЕТЕНТНОСТИ ЭКСПЕРТА

Введение

Среди основных задач, которые приходится решать при проведении коллективной (групповой) экспертизы, обычно внимание специалистов акцентируется на трех:

- подбор экспертов;
- оптимизация работы экспертов в ходе проведения экспертизы;
- обработка результатов (оценок) экспертов, полученных в ходе проведения экспертизы.

По сути, все три задачи ориентированы на устранение одной проблемы – уменьшение разброса мнений (оценок) экспертов в результатах экспертизы. Наиболее известны методы решения этой проблемы в рамках второй задачи, состоящие в применении различных приемов и способов организации процесса экспертизы, в ходе которого с помощью применения специальных методик и системы организационных мероприятий обеспечивается схождение мнений экспертов к единому. Это так называемые сложные комплексные экспертизы [1,2,3], характерным представителем которых является популярный метод Дельфи, обеспечивающий выработку согласованного мнения экспертов в ходе комплексной многотуровой экспертизы [2,3]. Хотя этот метод в литературе характеризуется в целом положительно (обычно в качестве негатива отмечается трудоемкость и сложность организации процесса многотуровой экспертизы), можно предположить ситуации, где получаемое единое мнение экспертов для некоторых из них является вынужденным компромиссом, к которому подталкивает изматывающая процедура экспертизы плюс упорное невосприятие их точек зрения другими экспертами.

Решение задач подбора экспертов и организации обработки данных коллективной экспертизы напрямую связаны с проблемой некомпетентности экспертов, хотя пути преодоления этой проблемы для каждой задачи свои: в первом случае – недопущение в группу низкоквалифицированных экспертов,

© Архипов А.Е., Архипова С.А., Носок С.А., 2006

во втором – учет уровня компетентности эксперта в специально разработанных методиках обработки результатов экспертизы. Обе эти задачи требуют определения уровня компетентности экспертов.

Постановка задачи

Из известных методов оценки уровня компетентности, по-видимому, наиболее “жестким” является метод тестирования претендентов [2,6], однако его применение часто наталкивается на неприятие со стороны претендентов, обостряемое вопросом этической правомерности тестирования эксперта [2].

В этом плане более лояльным является документационный метод [2,3,4,6], предполагающий оценивать уровень компетентности эксперта по объективным документированным данным: числу публикаций и ссылок на работы эксперта, ученой степени и званию, должности, стажу и т.п. Слабым местом документационного подхода является необходимость построения модели компетентности эксперта, позволяющей по комплексу документированных характеристик сформировать интегральный показатель степени компетентности (например, в виде линейной форм взвешенных количественных значений отдельных характеристик [4]).

Достаточно часто используются методы само- и взаимооценки экспертов [2,3,4,5,6] в различных модификациях, сводящиеся к получению балльных оценок уровня компетентности каждого из экспертов, выставляемых ему его коллегами и им самим, с последующей обработкой этой совокупности оценок по специально разработанным методикам.

К сожалению, для названных методов характерен очень высокий уровень субъективизма, обусловленный влиянием различных факторов: психологических (неадекватная само- [2] и взаимооценка, личный антагонизм экспертов), конъюнктурных (в случае личной заинтересованности эксперта в исходе экспертизы), борьбы научных школ, направлений и т.п.

В [7] предложена процедура комплексной оценки уровня компетентности эксперта по модели компетентности, формируемой в процессе совместной обработки сведений, полученных документационным методом, и результатов само- и взаимооценки. Предполагается, что этот комплексный подход позволит избежать недостатков, свойственных каждому из используемых методов в отдельности, однако не-

обходимость построения моделей компетентности экспертов делает процедуру обработки экспертных данных весьма громоздкой.

Поэтому перспективным является подход, позволяющий оценить практическую пригодность к последующему использованию (в том числе и для дополнительной обработки) полученных в ходе экспертизы данных непосредственно по результатам анализа этих данных. В рамках упомянутого подхода разработано несколько методов анализа экспертной информации, в основе которых лежат оценки степени согласованности и непротиворечивости заключений экспертов [1,3,6]. К сожалению, используемые в этих методах порядковые шкалы не позволяют оценить фактическую меру разброса экспертных данных, в частности, отделить грубоошибочные результаты от более точных. Однако именно последняя задача решалась в работах [8,9], в которых рассмотрены эвристические методы обнаружения так называемых аномальных экспертов, базирующиеся на введении типизации экспертов в зависимости от стратегии их поведения во время экспертного опроса. Эта типизация может опираться на результаты анализа выборочных моментов, рассчитанных для каждого из экспертов непосредственно по выборкам их индивидуальных экспертных оценок, на сопоставление форм эмпирических распределений этих индивидуальных выборок, на результаты кластерной классификации всей выборочной совокупности данных экспертизы. Следует учитывать, что типизация экспертов возможна лишь в случае, когда коллектив экспертов высказывается по достаточно длинному перечню объектов экспертизы (экспертируемых свойств, признаков, качеств и т.д.), позволяющему определить особенности (в частности, аномалии) поведения экспертов в процессе экспертизы.

В случае кластеризации данных экспертизы тем или иным методом кластерного анализа, выявления и определения совокупности "нормальных" экспертов, возможно простое геометрическое обоснование расчета значений уровней компетентности экспертов. В качестве таковых значений рационально выбрать обратную величину к расстоянию r от точки, представляющей каждого из экспертов в пространстве экспертных оценок, до центра кластера "нормальных" экспертов, рассчитанному в соответствии с метрикой, используемой при кластеризации экспертов.

Модель компетентности эксперта

Уверенная идентификация кластера "нормальных" экспертов требует некоторой опорной информации о характеристиках входящих в этот кластер экспертов. В качестве подобной информации удобно брать упомянутые выше признаки, используемые для типизации экспертов: выборочные моментные характеристики, эмпирические распределения, другие индивидуализированные характеристики, рассчитываемые для каждого эксперта в отдельности. Если предположить, что совокупность таких персонифицированных характеристик, представимых в общем случае вектором $[X_1, X_2, \dots, X_k]$, содержит в себе определенную информацию об уровне компетентности C эксперта, то можно попытаться построить модель компетентности эксперта в виде зависимости

$$C = \mu(X_1, X_2, \dots, X_k, A), \quad (1)$$

где в качестве оценок компетентности используются величины, связанные с рассчитанными по результатам кластерного анализа индивидуальными экспертными расстояниями

$$r_j : c_j^{(1)} = \frac{1}{r_j}, c_j^{(2)} = \frac{1}{1 + r_j}, c_j^{(3)} = e^{-r_j}. \text{ В простейшем случае модель (1)}$$

может быть описана линейной регрессией:

$$C = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_g X_1 X_2 \dots X_k + \dots \quad (2)$$

Проверить насколько реализуема гипотеза построения модели (1) можно, выполнив идентификацию этой модели по реальным данным и оценив её работоспособность путем сопоставления результатов модельных исследований с выводами, полученными с применением уже отработанных исследовательских приемов. Для этого обратимся к рассматривавшейся в статьях [8,9] задаче обработки экспертных данных, в которой результаты коллективной экспертизы, выполненной группой из N экспертов, представлены прямоугольной матрицей размера $M \times N$:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ z_{M1} & \dots & z_{MN} \end{bmatrix} = \{z_{ij}\}, \quad (3)$$

где M – количество вынесенных на обсуждение экспертов вопросов, z_{ij} – ответ на i -тый вопрос j -того эксперта, представленный в форме оценки в L -бальной шкале $\{0, 1, 2, \dots, l_{\max}\}$, $L = 1 + l_{\max}$. Для анализа качества результатов экспертизы исследуются отклонения оценок каждого из экспертов от средних по строке значений:

$$\bar{z}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_{ij},$$

сведенные в матрицу

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \dots & \delta_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \delta_{M1} & \dots & \delta_{MN} \end{bmatrix} = \{\delta_{ij}\}, \quad (4)$$

$\delta_{ij} = z_{ij} - \bar{z}_i$, аналогичную по своей структуре матрице (3).

При идентификации модели (1) в качестве факторов, используемых для формирования регрессоров в выражении (2), выберем уже рассматривавшиеся в [8] статистики, индивидуально характеризующие действия каждого из экспертов:

- среднее отклонений оценок j -того эксперта

$$\bar{\delta}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \delta_{ij}, \quad (5)$$

- выборочный второй начальный момент

$$\mu_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \delta_{ij}^2, \quad (6)$$

- выборочная дисперсия

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\delta_{ij} - \bar{\delta}_j)^2, \quad (7)$$

- оценка энтропии отклонений j -того эксперта

$$H_j = - \sum_{t=1}^T \frac{\omega_{tj}}{M} \ln \frac{\omega_{tj}}{M} = - \frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \omega_{tj} \ln \omega_{tj} + \ln M, \quad (8)$$

где $T = 2l_{\max}$ – количество интервалов варьирования значений отклонений оценок экспертов, ω_{tj} – частота попаданий значений отклоне-

ний j -того эксперта в t -ый интервал, рассчитанная на совокупности интервалов $[-l_{\max}, -l_{\max} + 1), \dots, [-1, 0), \dots, [l_{\max} - 1, l_{\max})$.

Оценки уровня компетентности C находим, как уже отмечалось выше, по результатам кластерного анализа экспертных данных в M -мерном признаковом пространстве с евклидовой метрикой, где каждому объекту классификации (эксперту) соответствует точка с координатами $(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{Mj})$, называемая образом j -того эксперта. Для этого после выделения кластера нормальных экспертов [8,9] определяются координаты его центра $(z_{10}, z_{20}, \dots, z_{M0})$, а затем оцениваются расстояния между центром и образом каждого из N экспертов:

$$r_j = \left[\sum_{i=1}^M (z_{ij} - z_{i0})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, j = \overline{1, N}, \quad (9)$$

которые затем, с привлечением соответствующих вариантов пересчетных соотношений, преобразуются в наборы значений оценок индивидуальных компетентностей экспертов $\{c_j^{(1)}\}, \{c_j^{(2)}\}, \{c_j^{(3)}\}, j = \overline{1, N}$.

Подставляя в выражение (5)-(9) количественные данные, представленные соответствующими элементами матриц (3), (4), получаем расчетным путем всю информацию по значениям факторов и зависимой переменной, необходимую для идентификации модели компетентности в форме (2). Решение задачи структурно-параметрической идентификации для набора значений зависимой переменной C , полученных по второму варианту расчетных соотношений $c_i = \frac{1}{(r_i + 1)}$,

приводит к трем близким по своим качествам моделям:

$$C = a_0 + a_1 \mu^{-1} - a_2 \bar{\delta} - a_3 \sigma^2, \quad (10)$$

$$C = a_0 + a_1 \mu^{-1} - a_2 \bar{\delta} - a_3 \mu \sigma^2, \quad (11)$$

$$C = a_0 + a_1 \mu^{-1} + a_2 \bar{\delta} H - a_3 (\bar{\delta})^{-1}, \quad (12)$$

из которых модель (10) имеет несколько более высокие аппроксимативные качества. В частности, для этой модели коэффициент детерминации $R^2=0,917$, тогда как для двух других моделей имеем: для модели (11) $R^2=0,909$, для модели (12) $R^2=0,911$. Для пересчетного

соотношения $c_i = \frac{1}{r_i}$ лучшей является модель компетентности, структурно совпадающая с выражением (10), что говорит об устойчивости этой структуры в классе гиперболических пересчетных соотношений.

Для третьего варианта пересчета $c_i = e^{-r_i}$ подбор моделей приводит к зависимости вида:

$$C = a_0 + a_1 \frac{1}{\delta \mu^2} - a_2 \frac{1}{(\bar{\delta})^2} - a_3 \frac{1}{\mu H} \quad (13)$$

Пересчетные соотношения $c^{(2)} = \frac{1}{(1+r)}$ и $c^{(3)} = e^{-r}$ ограничивают диапазон изменения значений компетентности экспертов промежуток $[0,1]$, тогда как пересчет по формуле $c^{(1)} = \frac{1}{r}$ определяет этот диапазон полуоткрытым интервалом $[0,\infty)$, что не удобно при выполнении практических расчетов, где значения компетентности экспертов используются в качестве весовых коэффициентов при обработке экспертных данных. В модели (13), полученной для пересчетного соотношения экспоненциального вида, значения компетентности реальных экспертов оказываются смещенными к 0, занимая в общем промежутке возможных значений $[0,1]$ узкий диапазон значений $0-10^{-3}$. В итоге лишь модель компетентности (10), построенная для оценок компетентностей, полученных с применением пересчетного соотношения $c = \frac{1}{(1+r)}$, позволяет достаточно полно использовать диапазон возможных значений $[0,1]$ и может быть рекомендована для практического применения.

Рассчитанные методом наименьших квадратов оценки параметров модели (10) имеют следующие значения: $\tilde{a}_0 = 0,0392; \tilde{a}_1 = 0,068; \tilde{a}_2 = -0,0081; \tilde{a}_3 = -0,00421$. В ходе апробации модели на реальных данных была выделена область значений компетентностей, характерных для аномальных экспертов. Это 20% нижней части шкалы компетентности, т.е. $0 \leq c_i \leq 0,2$.

Заключение

По результатам анализа и обработки данных экспертных опросов получена модель компетентности эксперта, применение которой позволяет значительно упростить процедуру оценки компетентности, в частности, становится возможным непосредственное вычисление этой оценки из набора экспертных данных. При этом отпадает необходимость выполнения достаточно сложной процедуры кластерного анализа, результаты которой не всегда допускают легкую и прозрачную интерпретацию полученных результатов, в частности объективное выделение кластера "нормальных" экспертов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский С.А. Использование экспертных оценок в задачах предварительной алгоритмизации. – М.: ЦИНИ "Электроника", 1984. – 36с.
2. Матвієнко В.Я. Прогностика. – К.: Українські пропілеї, 2000. – 484с.
3. Грабовецький Б.Є. Економічне прогнозування і планування. – К.: Центр навчальної літератури, 2003. – 188с.
4. Китаев Н.Н. Групповые экспертные оценки. – М.: "Знание", 1975. – 64с.
5. Малин А.С., Мухин В.И. Исследование систем управления. – М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2004. – 400с.
6. Литвак Б.Г. Экспертная информация: Методы получения и анализа. – М.: Радио и связь, 1982. – 184с.
7. Архипов О.Є., Архіпова С.А. Математичне моделювання соціальних систем і процесів. – К.: ІВЦ "Політехніка", 2002. – 60с.
8. Архипов А.Е., Архипова С.А., Носок С.А., Пишко И.В. Применение методов классификации в задаче обработки данных экспертного опроса//Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2003. - №2(10). – с.104-108
9. Архипов А.Е., Архипова С.А., Носок С.А. Применение кластерного анализа для структурирования данных экспертного опроса// Адаптивні системи автоматичного управління. 2003. - №6(26). – с.55-61

Получено 23.03.2005 г.

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ

Введение

Задача классификации заключается в отнесении образцов входных данных к одному или нескольким классам из заранее определенного набора [1]. В индуктивном подходе классификация осуществляется на основе обучающей выборки, которая содержит примеры образцов данных с заранее назначенными метками классов. Часто входные данные представлены в виде вектора числовых величин. Элементы вектора – действительные числа (например, результаты измерений некоторых характеристик объекта или их функции), или бинарные величины (индикаторы наличия некоторых признаков во входных данных).

Такая входная векторная информация зачастую не содержит в явном виде релевантной для классификации информации, поэтому полезной является ее трансформация. Нами разработаны методы трансформации входной информации (числовой [2], текстовой [3], зрительной [4]) в бинарные распределенные представления. Для классификации этих представлений можно использовать линейные классификаторы – как *SVM* [5], так и более вычислительно эффективные и естественно работающие с многими классами персептроноподобные [4, 6]. Задачей данной работы является исследование эффективности предложенных методов распределенного представления информации, а также модификаций методов классификации для искусственных и естественных данных разных модальностей.

Классификация числовой векторной информации.

Для исследования методов распределенного представления и классификации числовой информации были выбраны следующие известные тестовые задачи: Леонарда-Крамера *LK*, исключаящее ИЛИ, двойная спираль [6], данные, генерируемые *DataGen* [6], а также данные базы *Elena* [7]. Размерность *A* векторов данных составляла от 2 до 36, число классов *C* – от 2 до 11, число образцов в обучающей и тестирующей выборках – от 75 до 3218.

© Мисуно И.С., Рачковский Д.А., Слипченко С.В., 2006

Все выбранные задачи имеют существенно нелинейные области классов. Поэтому в качестве нелинейного преобразования использовались методы кодирования числовых векторов рецептивными полями *RSC* и *Prager* [2], которые выделяют бинарные признаки – индикаторы попадания входного A -мерного вектора в s -мерные ($s < A$) гиперпрямоугольные поля со случайным расположением и размером. Пусть общее число признаков (полей) N , из них среднее число единичных признаков $M = Nr$. Плотность кода r управляется параметром – средним размером поля. С r связана разрешающая способность кодирования (средний размер *cell* элементарной ячейки – области входного пространства, где код не изменяется), а также распределение $P(s)$ размерности полей s ($s = 0, \dots, S$), где $S < A$ – максимальная заданная размерность полей. При фиксированной r увеличение N приводит к уменьшению *cell*. В [2] получены аналитические выражения для вычисления этих параметров, а также для зависимости перекрытия кодов от координат точек входного пространства. Последняя зависимость может рассматриваться в качестве ядра [5]. Использование ядра эквивалентно использованию кодов с бесконечно большим N и *cell*=0. Поэтому здесь r оказывает влияние только на форму характеристики перекрытия, которая определяется пропорцией полей разной размерности $P(s)$.

Для исследования влияния данных параметров на качество классификации использовалась следующая схема экспериментов. Векторы входных данных тестовых задач преобразовывались в коды *RSC* и *Prager* с разными параметрами. Эти коды использовались в качестве входной информации для линейных классификаторов: коды обучающих выборок для обучения, коды тестирующих выборок – для тестирования. Показателем качества классификации служил процент ошибок при тестировании.

В качестве линейных классификаторов использовались *SVM* [5], а также варианты разрабатываемых нами персептроноподобных классификаторов [4]. Кроме того, классификация осуществлялась с использованием ядерного *SVM* – на полученных нами ядрах (*RSC* и *Prager*), а также на стандартных ядрах (гауссово, полиномиальное). Известно, что *SVM* не обучается в ходе процесса, требует решения вычислительно сложной задачи нелинейного программирования, а также проводит оптимальную поверхность только для двух классов. В

данной работе для преодоления недостатков *SVM* применен разработанный нами персептрон с защитной полосой и правилом одновременного обучения на несколько классов. В нем выходной сигнал нейронов, соответствующих классам, определяется как $y_c = \sum_i x_i w_{ic}$, где w_{ic} – веса обучаемых связей, x_i – значение i -го элемента входного вектора. Для нейрона правильного класса $y_{c\text{-true}} = y_{c\text{-true}}(1-T)$, $0 < T < 1$ – величина "защитной полосы". Результатом классификации является индекс (номер) c^* нейрона с максимальной активацией: $c^* = \operatorname{argmax}_c y_c$. При ошибке ($c^* \neq c_{\text{true}}$) связи модифицируются следующим образом: $w_{ic} = w_{ic} + \Delta w$ для $c = c_{\text{true}}$ и $w_{ic} = w_{ic} - f(\Delta w)$ для $c: y_c > y_{c\text{-true}}$, где c_{true} – индекс правильного класса. Например, $f(\Delta w) = \Delta w/|c|$.

Результаты экспериментального исследования. На рис. 1 приведены результаты для задачи Леонарда-Крамера – зависимость процента ошибок классификации % errors, размера элементарной ячейки *cell* и средней размерности полей $E\{s\}$ от плотности кода p . Для кодирования *Prager* и *RSC*, для *SVM* и персептрона с защитной полосой ($T=0.75$) приведены усредненные результаты по 10 реализациям кодов при $N=100$. Также приведены результаты для *SVM* с ядрами (*Kernel*). Для всех случаев (а также для больших значений N , не показанных на рисунке) минимум ошибок достигается вблизи $p=0,25$, что соответствует минимальному значению *cell* и $E\{s\}=2$.

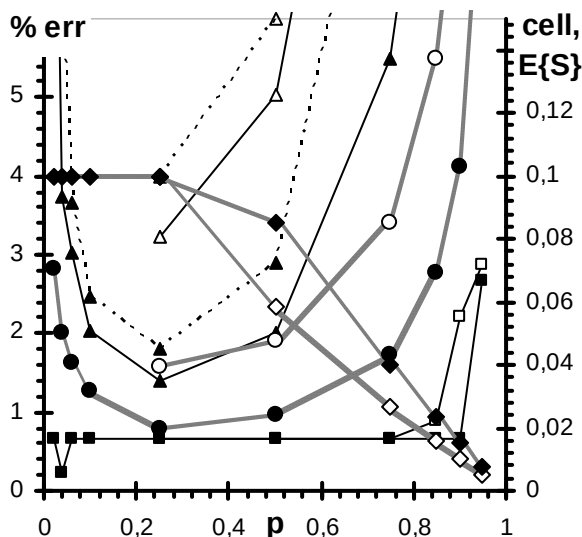


Рис. 1

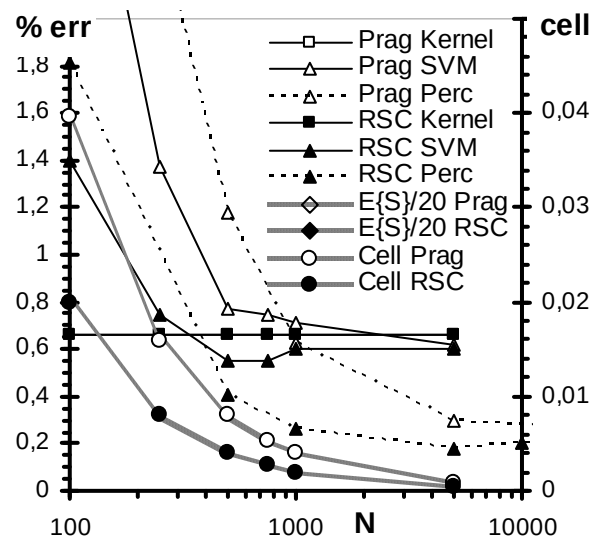


Рис. 2

Результаты рис. 2 показывают зависимость % errors и *cell* от N при $p=0,25$. Приведены усредненные результаты по 10 реализациям кодов. Уже при $N=500$ результат для *SVM* близок к результату для

ядра. Для персептрона с полосой ($T=0.75$) ошибка при $N>(300-1000)$ ниже, чем для *SVM*. Время обучения для персептрона меньше, чем для *SVM* в 20 раз, а тестирования – в 100 и более раз.

Результаты экспериментов для данных *DataGen* приведены на рис. 3 при $A=4$, $S=3$, $C=4$, $R=4$ (параметр, регулирующий сложность областей классов [6]), число образцов на класс равно 100. Усреднение проводилось по 5 реализациям точек *DataGen* и 5 реализациям кодов. Для таких параметров минимальное значение *cell* соответствует $p \sim 0.3$ и близко к нему в интервале $p=0.125 \dots 0.5$. Минимум ошибки для *SVM* и для персептрона с полосой также достигается в этом интервале. При этом для $N=100$ он смещен в сторону больших значений p (что обеспечивает большую стабильность M). При $N=1000$ минимум смещается в сторону меньших p , где обеспечивается большая реальная размерность рецептивных полей, M остается достаточно большим, а *cell* – малым. Для персептрона с полосой ($T=0.75$) достигаемый минимум ошибки соответствует уровню *SVM*, однако при отклонении от минимума ошибка для *SVM* увеличивается медленнее. Отметим, что кодирование с $S=2$ и $S=5$ дает сравнимые результаты классификации. Время обучения для персептрона в 20 раз, а тестирования примерно в 500 раз меньше, чем для *SVM*.

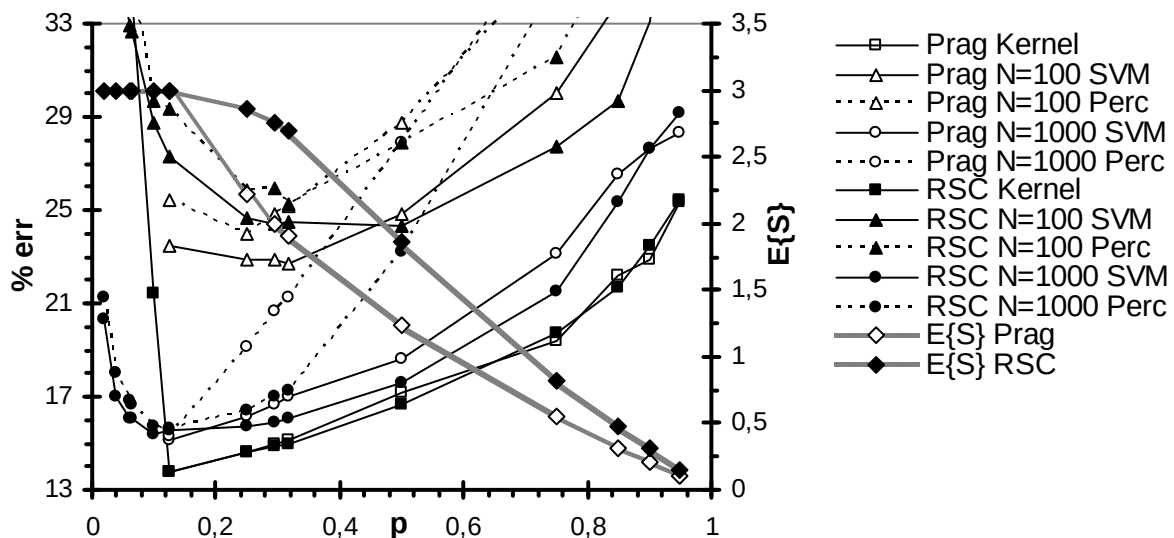


Рис. 3

Для искусственных данных базы *Elena* использовались параметры кодирования $N=1000$, $A=S=2$, $p=0.25$; для естественных (*Iris*, *Phoneme*, *Satimage*, *Texture*) – $N=10000$, $S=2$, 5(4), $p=0.1$ или 0.25. В таблице 1 приведены результаты исследования – процент ошибок

классификации. Для *SVM* и персептрона результаты получены усреднением по 10 реализациям кодов *RSC* и *Prager*. Там же приведены лучшие результаты известных методов *kNN*, *MLP*, *IRVQ* (см. [7]). Сравнение результатов показывает, что с помощью кодирования *RSC* и *Prager* получен лучший результат на *Concentric*, *Phoneme*, *Texture* и второй результат для *Satimage* и *Gaussian 7D*. Для остальных задач результаты незначительно уступают лучшим методам: *kNN* с небольшим отрывом лидирует на естественных данных *Satimage* и *Iris*, *MLP* и *IRVQ* - на искусственных *Gaussian* и *Clouds*. Время обучения для персептрона в среднем в несколько раз меньше, чем для *SVM*, а тестирования – в десятки раз меньше.

Таблица 1

Наборы данных	RSC SVM	RSC ядро	RSC перс.	Prager SVM	Prager ядро	kNN	MLP	IRVQ
Clouds	12,68	14,84	–	12,4	14,8	11,8	12,2	11,7
Concentric	1,36	1,2	–	1,17	1,04	1,7	2,8	1,5
Gaussian2 S=2	28,12	35,12	–	27,83	35,64	27,4	26,8	27,2
Gaussian7 S=2	14,35	15,68	–	14,36	15,76	15,9	15,3	11,5
Gaussian7 S=5	14,69	14,64	–	13,36	15,12	–	–	–
Iris S=2	6,53	6,67	5,33	5,59	6,67	4	4,3	6,7
Iris S=4	4,27	6,67	5,73	6,13	6,67	–	–	–
Phoneme S=2	14,12	11,51	13,7	15,79	14,47	12,3	16,3	16,4
Phoneme S=5	13,61	11,62	13,19	14,82	12,62	–	–	–
Satimage S=2	10,06	10,13	9,15	10,82	10,79	9,9	12,3	11,4
Satimage S=5	10,11	–	9,1	10,64	–	–	–	–
Texture S=2	0,82	0,76	1,13	0,82	0,80	1,9	2,0	3,1
Texture S=5	0,73	–	1,07	0,74	–	–	–	–

Классификация текстов и изображения. Традиционные подходы к классификации текстов используют в качестве элементов их векторных представлений функции частот встречаемости слов. Для сокращения размерности векторов могут применяться методы отбора информативных признаков [4], однако даже в случае отсутствия учета зависимостей между признаками вычислительные затраты на отбор квадратично растут с их числом. Нами предлагается для сокращения размерности применить распределенные представления. Для этого каждому слову поставим в соответствие N -мерный код с m случайно расположенными единицами. Распределенное N -мерное представление текста будем формировать суммой векторов слов с последующей пороговой операцией, либо контекстно-зависимым прореживанием *CDT* (см. в [3]), и далее использовать в задаче классифика-

ции. Тестирование проводилось на текстах коллекции *Reuters-21578* [3] с помощью *SVM*. Для категорий *TOP-10* результат *BER* (точка перелома характеристики полнота-точность [3]) для исходного представления $N=20000$ составляет 0.913. Применение распределенных представлений с $N^*=1000$, $m=2$ позволило получить сравнимый результат 0.861, а использование *CDT* в ряде случаев повышало его на несколько процентов.

Аналогично формируемые распределенные представления исследовались при классификации изображений рукописных цифр базы *MNIST* [4]. Изображения кодировались путем выделения бинарных признаков. Наличие признака соответствовало комбинации белых и черных точек в некоторых позициях сетчатки. В результате кодирования формировалось "первичное" бинарное распределенное представление. Затем осуществлялось его преобразование во "вторичное" представление по той же методике, что и для текстовой информации, и классификация "вторичных" распределенных представлений.

Исследовалась классификация при сокращении размерности с N до N^* (таблица 2). Строка *sel* содержит число ошибок классификации, полученное с применением отбора признаков [4], а *distr* - с использованием распределенных представлений. Результаты для распределенных представлений значительно превышают результаты исходных представлений для тех же N (приведены в скобках в первой строке) и находятся на уровне результатов с отбором признаков.

Таблица 2

N (err)	5000 (667)	10000 (407)		50000 (195)			128000 (160)		
N^*	1000	1000	5000	1000	5000	10000	1000	5000	10000
sel	820	578	420	492	264	242	474	261	218
distr	904	727	415	632	274	213	826	264	204

Выводы. Исследованы разработанные бинарные распределенные представления векторных данных (числовых, текстовых, изображений) в задачах классификации. Проведен сравнительный анализ результатов для разных методов и задач с искусственными и естественными данными. Исследования показали, что полученные ранее аналитические выражения для характеристик кодов числовых векторов *RSC-Prager* позволяют выбирать их параметры, обеспечивающие высокие результаты в задачах классификации при использовании линейных классификаторов. Результаты, полученные предложенным персептроном с защитной полосой и одновременным обучением на не-

сколько классов, сопоставимы с результатами одного из лучших классификаторов *SVM* при значительном уменьшении времени обучения и распознавания. Результаты, полученные с ядрами *RSC-Prager*, также позволяют сократить время обучения для малых *S*.

Применение распределенного кодирования для представления бинарных признаков в задачах классификации текстов и изображений также позволило получить вычислительно эффективные решения при сохранении качества классификации. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка вычислительно эффективных ядер *RSC* и *Prager*, а также распределенных представлений и ядер для более адекватного учета структурной информации во входных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. 1. *Duda R., Hart P., Stork D.* Pattern Classification, 2nd ed. - New York: John Wiley & Sons, 2000. - 680 p.
2. 2. *Слипченко С.В., Мусуно И.С., Рачковский Д.А.* Свойства кодирования числовых величин случайными гиперпрямоугольными рецептивными полями // Математические машины и системы. – 2005, № 4. – С. 15-29.
3. 3. *Мусуно И.С., Рачковский Д.А., Слипченко С.В., Соколов А.М.* Поиск текстовой информации с помощью векторных представлений // Проблемы программирования. – 2005, № 4. – С. 50–59.
4. 4. *Мусуно И.С., Рачковский Д.А., Слипченко С.В.* Экспериментальное исследование классификации рукописных цифр // Системные технологии. – 2005. – № 4 (39). – С. 110–133.
5. 5. *Vapnik V.N.* Statistical Learning Theory. – New York: John Wiley & Sons, 1998. – 768 p.
6. 6. *Мусуно И.С., Рачковский Д.А., Ревунова Е.Г., Слипченко С.В., Соколов А.М., Тетерюк А.Е.* Модульный программный нейрокомпьютер SNC: реализация и применение // УСиМ. – 2005, № 2. – С. 74–85.
7. 7. *Zhora D.* Evaluating Performance of Random Subspace Classifier on ELENA Classification Database // Artificial Neural Networks: Biological Inspirations – ICANN 2005. – Springer–Verlag Berlin Heidelberg. – 2005. – P. 343–349.

Получено 17.03.2006 г.

ИММУННЫЙ КЛАССИФИКАТОР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ)

Введение

Существует несколько теорий [1,2,3] и математических моделей [4,5,6,7], объясняющих иммунологические явления. Существует также определенное число компьютерных моделей [8,9,10,11], для моделирования различных компонентов входящих в состав иммунной системы и полное ее поведение с биологической точки зрения. С другой стороны, естественная иммунная система является источником вдохновения для разработки информационных методологий для решения прикладных задач. В настоящее время исследователи используют лишь три иммунологических метода: теорию иммунной сети, механизм отрицательного отбора и принцип клонального отбора. В настоящей работе мы исследуем механизм отрицательного отбора. Алгоритм отрицательного отбора и его модификации, несмотря на кажущуюся свою простоту является мощным инструментом для решения в первую очередь таких задач, как защита компьютерных сетей [12], защита от компьютерных вирусов [13], обнаружение аномальных объектов на изображениях [14,], сегментации образов [15], для обнаружения аномалий в временных рядах данных [16], мониторинг вычислительных процессов в операционной системе UNIX [17], диагностика отказов в авиации [18].

Суть механизма отрицательного отбора заключается в том, что иммунная система стремится обеспечить толерантность к “своим” клеткам и молекулам. Это развивает способность иммунной системы обнаруживать неизвестные антигены при отсутствии какой-либо реакции на свои клетки. В течение текущего поколения с помощью псевдослучайного процесса генетической перестановки создаются рецепторы Т-клеток. После этого, они подвергаются цензурированию в вилочковой железе (Тимусе), посредством процесса который называется “отрицательным отбором”. В Тимусе, Т-клетки, реагирующие против “своих” белков, разрушаются и только те из них, которые не связываются со “своими” белками, позволяется покинуть Тимус.

© В.И. Литвиненко, 2006

Эти созревшие Т-клетки после этого циркулируют по всему телу, чтобы осуществлять свои иммунологические функции и защитить в целом организм против чужеродных антигенов.

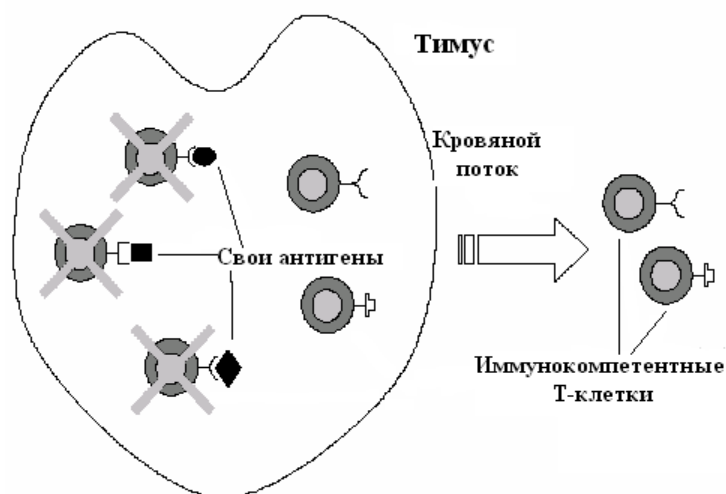


Рис.1 Упрощенное представление отрицательного отбора в Тимусе. Незрелые Т-клетки, которые распознают свои антигены, удаляются из репертуара. Наоборот, те, которые не распознают любой свой антиген, становятся иммунокомпетентными клетками и попадают в кровяной поток

Алгоритм *отрицательного отбора* (АОО) был предложен Стефанией Форрест в 1994 году [19], данный алгоритм применяется механизм, используемый иммунной системой при обучении Т-клеток для распознавания чужих антигенов и в дальнейшем препятствовании им распознавать собственные клетки организма как “свои”. Идея заключалась в генерировании набора бинарных датчиков создаваемых кандидатов и затем отказаться от тех из них, которые в дальнейшем распознают “свои” данные из набора обучающей выборки. В дальнейшем эти датчики или детекторы могут использоваться, для обнаружения каких-либо аномалий. Так что АОО состоит из трех стадий: определение “своих”, генерирование датчиков и контроль за возникновением аномалий. Были предложены различные разновидности этого алгоритма (датчик, генерирующий шаблоны). Первичными применениями АОО было в области обнаружение изменений (или аномалий), где датчики генерировались в дополнительное пространство, которое может обнаружить изменения в образцах данных. Главный компонент АОО – выбор соответствующего правила, которое определяет сходство между двумя образцами, чтобы осуществить классификацию свои/чужие (нормальные/ неправильные) образы.

Временная сложность генерирования датчиков линейна относительно размера "своих" данных. Необходима также оценка для определения размера набора датчиков чтобы гарантировать некоторый "уровень надежности" в обнаружении аномалий. Сгенерированные датчики имеющие высокий порог соответствия, становятся чувствительными к любой аномалии в данных, так что необходимо большое количество датчиков позволяющие достигнуть желательного уровня полной надежности. С другой стороны, если порог является слишком маленьким, не может быть возможной генерации разумного размера набора датчиков от доступных "своих". Это предлагает, что значение порога может использоваться, чтобы настроить надежность обнаружения против риска ложных положительных распознаваний. Это особенность применяется при обнаружении изменений в общем случае.

В работе [20] приводятся результаты работы, где автор рассмотрел и сравнил пять схем поколения датчиков (бинарных) алгоритмов отрицательного отбора: исчерпывающий, линейный, "жадный", бинарный шаблон, и мутация АОО. Последняя схема - измененная версия исчерпывающего алгоритма, который вводил соматическую гипермутацию и устранение избыточности к исчерпывающему АОО алгоритму для лучшей работы.

В работе [21] авторы проанализировали и сравнили различные правила бинарного соответствия в отрицательном отборе: r -смежное соответствие, соответствие r -куска, соответствие с использованием Хеммингового расстояния, и его разновидность – R&T-соответствие. Это таким образом обеспечивает директиву для того, чтобы выбрать различные правила соответствия для любых алгоритмов отрицательного отбора.

В других работах также исследовалось различное представление схемы отрицательного отбора и алгоритмов генерации датчиков для таких представлений [22]. В частности исследуемые представления включали гиперпрямоугольники (который можно интерпретировать как правила), нечеткие правила, и гиперсферы.

Предложено четыре различных алгоритма генерации датчиков, соответственно: 1) отрицательный отбор с правилами обнаружения (эволюционный алгоритм, для генерирования датчиков гиперкуба); 2) отрицательный отбор с нечеткими правилами обнаружения (эволюционный алгоритм, для генерирования датчиков нечетких правил), 3) от-

рицательный отбор на действительных числах (эвристический алгоритм, для генерирования гиперсферических детекторов), и 4) отрицательный отбор на основе рандомизированных действительных чисел (алгоритм позволяющий генерировать гиперсферические датчики основанный на методах Монте Карло). Разработан также гибридный алгоритм обучения, обладающий иммунитетом, который комбинирует способы генерирования детекторов 3) или 4) с алгоритмами классификации.

Другая разновидность модели отрицательного отбора предлагает использовать динамический алгоритм клонального отбора (Динамика), чтобы иметь дело с "чужим", задача заключается в обнаружения в условиях непрерывно меняющейся окружающей среде [23], В частности динамика основывается на идее Хофмеера [24] о динамике трех различных популяций: незрелая, зрелая, и популяция датчиков памяти. Первоначальные незрелые датчики, генерируются со случайными генотипами. Используя отрицательный отбор, новые незрелые датчики добавляются, для того чтобы общее количество датчиков сохранялось постоянным после предопределенного числа поколений (период поляризации T). Если датчик - в пределах его предопределенной продолжительности жизни L , и соответствующее число является большим, чем предопределенный порог активации A , он становится датчиком памяти. Зрелые датчики используются, чтобы идентифицировать неизвестные нападения. Однако, необходимо подтверждение человека отвечающего за безопасность (ко-стимуляция, который делает этот подход, зависящим от человеческого взаимодействия. В отечественных исследованиях, к сожалению данный алгоритм все еще остается малоизвестным.

Постановка задачи. Целью предлагаемой работы является изложение методологии синтеза алгоритмов отрицательного отбора для решения задач классификации. На тестовых задачах нами проведены численные эксперименты по исследованию влияния некоторых параметров алгоритма отрицательного отбора на качество решения задач классификации.

АЛГОРИТМ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ОТБОРА

Формально алгоритм отрицательного отбора можно представить в виде:

$$NegAlg = (C, P, M, r, n, s, pr) \quad (1)$$

U – общее число детекторов кандидатов

S – множество детекторов определяемых как “свой”

M – множество детекторов определяемых как “чужой”

r – кросс-реактивный порог

n – общее число назначаемых детекторов

s – размер множества детекторов

pr – правило совпадения строк в r – смежных позициях

В обобщенном виде данный алгоритм представлен на рис.2:

1. Инициализация: генерация случайного начального множества детекторов-кандидатов (строки или вектора)
2. Старт алгоритма: пока множество детекторов заданного размера еще не сгенерировано, выполнить:
 - 2.1. Оценка аффинности: определить аффинность между каждой “своей” клеткой и детектором-кандидатом.
 - 2.2. Отбор: если детектор-кандидат распознает любой “свой” элемент, этот кандидат устраняется, в противном случае детектор-кандидат помещается во множество детекторов.
3. Мониторинг: после того как сгенерировано множество детекторов, изучается любое новое множество строк. В этом случае, если какой-либо элемент из множества детекторов распознал элемент изучаемого множества, то это означает, что был обнаружен “чужой” элемент.

Рис. 2 Обобщенный стандартный алгоритм отрицательного отбора

На этапе обучения система, используя обучающую выборку образов (P) (свои антигены), создает множество (M) комплиментарных P образов, называемых *детекторами*. Далее процесс распознавания происходит так: новый образ, поступающий в систему сравнивается с множеством детекторов и при отсутствии совпадений распознается как “свой”; при наличии совпадения исследуемого образа хотя бы с одним детектором, он распознается как “чужой”. Данную схему можно проиллюстрировать следующим образом (рис. 3, 4).

Более детально алгоритм отрицательного отбора можно описать следующим образом.

Стадия обучения.

1. Случайно генерируется множество кандидатов детекторов (С). Каждый элемент этого множества имеет тоже представление что и исследуемый образ.

2. Каждый элемент из множества С сравнивается с элементами из множества Р и если обнаружено соответствие, то элемент множества С отбрасывается, иначе этот элемент сохраняется во множестве детекторов М.

Стадия распознавания.

Для исследуемой выборки Р* сравнивается каждый ее элемент со всеми элементами множества детекторов М. Если обнаружено хотя бы одно совпадение, то исследуемый элемент из Р* распознается как «чужой», иначе он считается «своим».

Выбор правила совпадения является критическим по отношению к производительности данного метода. Как правило в таких исследованиях используется правило совпадения “г-смежных битов”, позаимствованное из теоретической иммунологии. Согласно данному правилу, две строки совпадают друг с другом, если они идентичны по крайней мере в г-смежных позициях (где г-параметр правила совпадения).

Для сравнения элементов множеств между собой используется понятие степени совпадения элементов. Каждый элемент представлен в виде строки атрибутов, в качестве которых могут выступать двоичные числа, вещественные числа или просто символы. Для примера рассмотрим двоичное представление данных.

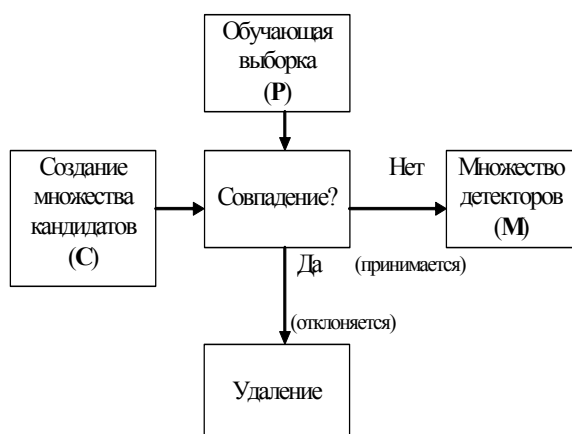


Рис. 3 Создание множества детекторов (обучение системы).

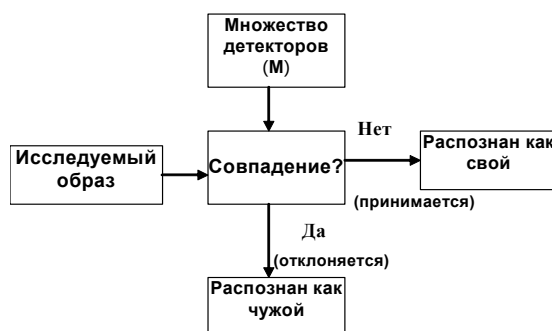


Рис.4 Работа системы (распознавание)

Образ на рисунке 3 может быть представлен в виде строки нулей и единиц таким образом, что черные пиксели означают «1», а белые «0».

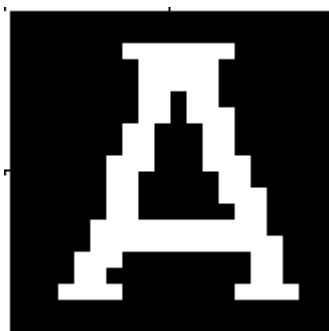


Рис. 5 Входной образ для распознавания (20x20)

В этом случае степень совпадения может быть определена как Хеммингово расстояние между двумя двоичными строками:

$$D_H = \sum_{i=1}^L \delta_i, \text{ где } \delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i = m_i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (2)$$

где L – длина строки представления образа; p_i, m_i – значения соответствующих элементов сравниваемых строк.

Например следующие две строки имеют степень совпадения равную 10 (рис. 6).

```

1 0 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 1 0 0
0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0
. . . . .

```

Рис. 6 Степень совпадения двух строк равная 10

Одним из параметров алгоритма является пороговое значение степени совпадения элементов множеств (ϕ), при превышении которого элементы считаются равными между собой.

В зависимости от того как представляются данные в системе, можно воспользоваться другими способами вычисления степени совпадения элементов множеств, например, Евклидовым расстоянием, Манхеттановским расстоянием и др.

Графическая интерпретация алгоритма отрицательного отбора

С целью более удобного представления рассмотрим двумерный случай распознавания, т.е. случай, когда распознаваемые строки (вектора) состоят из двух компонент, называемых атрибутами.

Пусть нам дано множество U – универсум и множество S векторов, которые классифицируются как “свои”, причем

$S \subset U$ (рис.7)

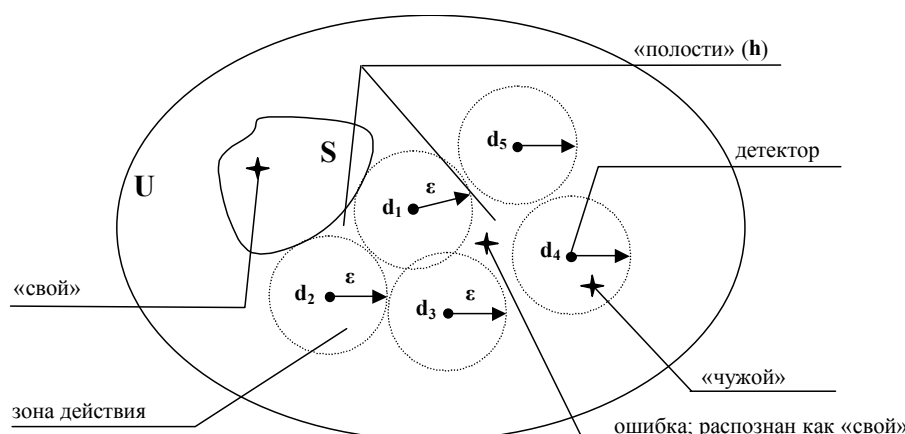


Рис. 7 Графическое представление объектов алгоритма

Алгоритм отрицательного отбора предполагает создание множества детекторов D таких, что $\forall d_i \in D \quad d_i \in U \wedge d_i \notin S$. Каждый детектор d_i имеет свою собственную окрестность распознавания или “зону действия”. Размеры зоны действия детектора определяются параметрам Σ (*Threshold*). Форма зоны определяется выбранным правилом сравнения строк (*Matching Rule*). Например, при выборе Евклидова расстояния в качестве правила сравнения, форма зоны действия детектора будет выглядеть, как показано на рисунке 8а. Рисунок 8б показывает зону действия в случае Манхэттенского расстояния. Зоны действия детекторов могут пересекаться друг с другом, но обязательным условием является тот факт, что ни одна зона не должна пересекать границу множества S . Это неизбежно приводит к образованию своеобразных “мертвых зон” или полостей h (рисунок 1).

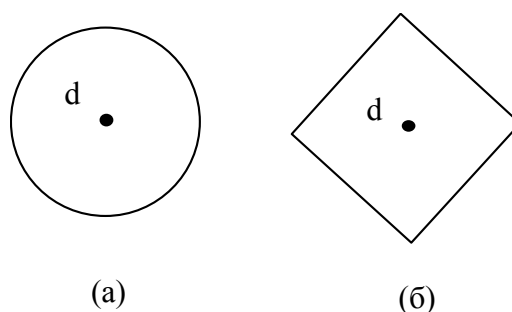


Рис. 8 Формы зон действия при различных правилах сравнения векторов (двумерный случай): а) Евклидово расстояние, б) Манхэттенское расстояние.

При распознавании вектора проверяется его попадание в зону действия какого-либо детектора или нескольких детекторов. Если такое попадание обнаружено, то вектор распознается как “чужой” ина-

че он распознается как “свой”. При распознавании вектора попавшего в одну из полостей h_i , он будет ошибочно распознан как “свой”, так как полости не покрываются ни одним из детекторов. Таким образом, мы сталкиваемся с необходимостью выбора компромиссного решения. С одной стороны можно уменьшить размеры полостей уменьшая зоны действия детекторов, кроме того мы можем располагать детекторы плотнее друг к другу с большим количеством взаимных пересечений зон. Но и в том и в другом случае это приведет к увеличению количества детекторов, необходимых для сохранения максимального покрытия множества $U - S$, и следовательно к увеличению вычислительных затрат алгоритма. Выходом из данной ситуации может стать разработка алгоритма оптимизации покрытия детекторами множества $U - S$, а также разработка новых правил сравнения строк, генерирующих более сложные формы зон действия и одновременного использования в рамках одного алгоритма различных правил сравнения.

ПРОСТОЙ ПРИМЕР РАСПОЗНАВАНИЯ

В качестве самого простого примера мы выбрали распознавание двухкомпонентных векторов. Взаимное расположение классов векторов показано на рисунке 9.

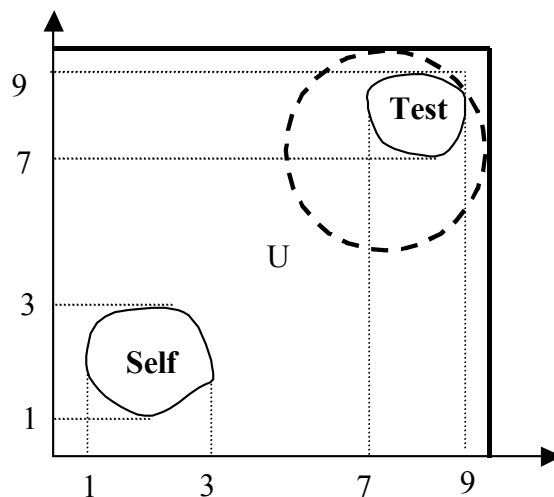


Рис. 9 Пример распознавания двухкомпонентных векторов.

В качестве обучающей выборки было выбрано 50 элементов множества, обозначенного на рисунке как “Self”. Тестовая выборка состояла из 10 элементов. Данный пример отличается удобством расположения класса “своих” векторов и класса тестируемых векторов. Де-

текторы практически всегда без труда полностью покрывают тестовый класс, что исключает возникновение ошибок распознавания.

ЗАДАЧА “IRIS FLOWER” И ПРОБЛЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Другим, более сложным примером является известная задача распознавания сорта цветов Ириса по четырем характеристикам их соцветий. Три класса цветов Ириса (Setosa, Versicolor и Virginica) расположены таким образом, что возникают трудности при их разделении и, соответственно, распознавании (рис. 10).

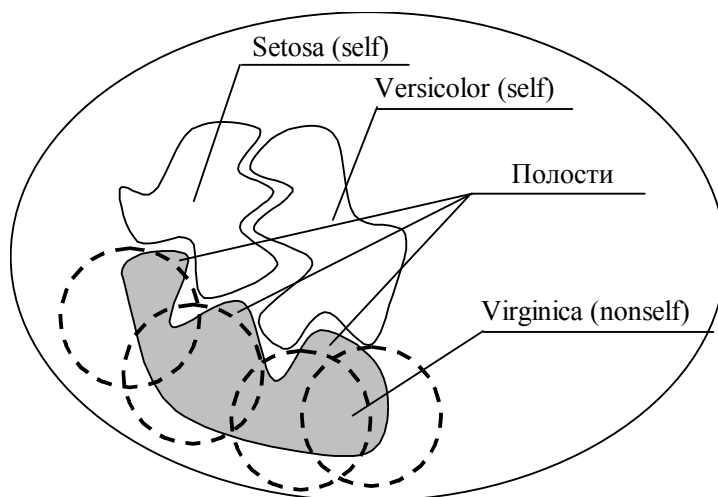


Рис. 10 Примерное взаимное расположение классов Setosa, Versicolor и Virginica. Для удобства представления вектора характеристик растений были спроецированы на двумерную плоскость.

В нашем примере мы объявили классы Setosa и Versicolor классами «своих» объектов, а класс Virginica – классом «чужих». Из рисунка видно, что при любом расположении детекторов остается невозможным полностью покрыть класс Virginica, что неизбежно приведет к ошибкам распознавания. Уменьшение радиуса зоны действия детекторов приведет к увеличению размера множества необходимых детекторов, а при достаточно высокой мощности универсума – к неоправданным затратам времени на их генерацию. Кроме того, увеличение количества детекторов замедлит и сам процесс распознавания. Ниже приведены возможные пути решения этой проблемы.

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Одним из компромиссных решений проблемы распознавания является использование динамических параметров при создании множества детекторов. В качестве таковых могут выступать параметр, определяющий размер зоны действия детектора ε (для Евклидова рас-

стояния это радиус зоны) и форма зоны действия (Matching Rule) (рис. 11).

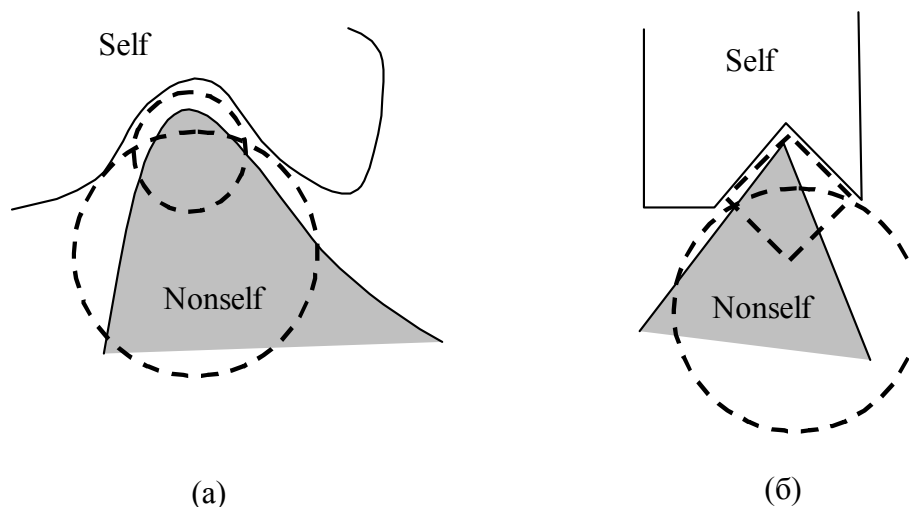


Рис. 11 Применение динамических параметров при генерации множества детекторов.

В этом случае пространственная форма детектора должна содержать в себе информацию о значениях параметров, которые он использует. Следовательно, представление детектора будет таким (рис. 12).

Детектор

Атрибут 1	Атрибут 2	Атрибут n	...	Threshold	Matching rule
-----------	-----------	-----------	-----	-----------	---------------

Рис.12 Форма детектора при использовании динамических параметров

И, конечно нельзя забывать об усовершенствовании алгоритма генерации множества детекторов.

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА

На рисунке 13 показано множество строк и отношения между ними. Пространство строк U , и пространство детекторов U_d изображены отдельно друг от друга для ясности, хотя в данной работе $U = U_d$. Вероятность совпадения P_m : вероятность того, что случайно выбранная строка и детектор совпадут согласно правилу совпадения. Вероятность ошибки P_f : вероятность того, что отдельная случайно взятая “чужая” строка не совпадет ни с одним детектором из R . Обозначим N_X размер (количество элементов) множества X . В частности N_S – размер множества “своих” и N_R – размер множества детекторов. Имея множество “своих” строк $S \subset U$, цель состоит в том,

чтобы найти множество детекторов $R \subset U_d$, которое совпадает с наибольшим количеством “чужих” строк из N ($N = U - S$), и при этом не совпадает ни с одной из “своих” строк из S . Детекторы в R выбираются из множества кандидатов детекторов C , и состоят из всех строк, которые не совпадают ни с одной строкой из S . Если бы мы включили все кандидаты детекторов в R , то мы бы смогли обнаружить все “чужие” строки во множестве N' , которое может быть или может не быть равным N . Вообще, только небольшое подмножество кандидатов детекторов будет включено в R , позволяя нам обнаружить все “чужие” строки из D (при $D \subset N' \subset N$). Вероятность ошибки $P_f = N_D/N_N$, или $P_f = N_D/N_U$, если $N_S \gg N_U$.

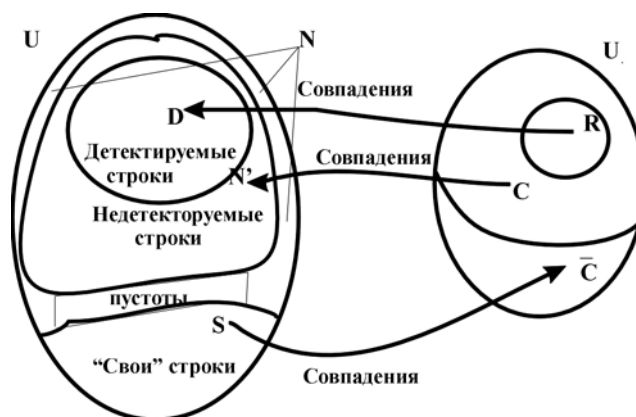


Рис. 13 – Отношения между подмножествами множества строк U и множества детекторов U_d . Множество строк разделено на “свои” строки S , и “чужие” строки N . Кандидатами детекторов (C) – являются те строки, которые не соответствуют ни одной строке из S . Множество детекторов R – это подмножество кандидатов детекторов. “Чужие” строки далее подразделяются на обнаруживаемые “чужие” строки (N') и пустоты ($H = N - N'$, на рисунке не помечены). Обнаруживаемые “чужие” строки могут быть обнаружены (множество D) или нет (множество $F = N' - D$, на рисунке не помечены), в зависимости от выбора множества R .

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ

Так как распознавание или обнаружение в алгоритме отрицательного отбора является по своей природе вероятностным процессом, мы должны уметь делать точные оценки на основе этих вероятностей для различных конфигураций решения задач распознавания и обнаружения.

Предположим, что мы имеем некоторую строку, которую мы хотим распознать. При этом строка может быть как прикладной про-

граммой, набором некоторых данных, или любым другим элементом компьютерной системы, который хранится в памяти. Используя алгоритм отрицательного отбора необходимо определить число и размер строк детекторов, которые будут гарантировать, например, что с определенной вероятностью будет обнаружено какое-либо изменение в строках.

Первоначально введем следующие обозначения:

N_{R_0} - Исходное количество строк-детекторов перед проверкой.

N_R - Число строк-детекторов после проверки.

N_S - Число “своих” строк.

P_M - Вероятность совпадения между двумя случайно выбранными строками.

f - Вероятность того что случайно выбранная строка не совпадет ни с одной из множества N_S “своих” строк $= (1 - P_M)^{N_S}$

P_f - Вероятность, что N_R детекторов не в состоянии осуществить распознавание.

Если P_M является маленьким а N_S велико, то

$$f \approx e^{-P_M N_S} \quad (1)$$

и,

$$N_R = N_{R_0} \times f \quad (2)$$

$$P_f = (1 - P_M)^{N_R} \quad (3)$$

Если P_M является маленьким, а N_R является большим, то

$$P_f \approx e^{-P_M N_R} \quad (4)$$

таким образом,

$$N_R = N_{R_0} \times f = \frac{-\ln P_f}{P_M} \quad (5)$$

Решая (5) относительно N_{R_0} , мы получаем следующее выражение:

$$N_{R_0} = \frac{-\ln P_f}{P_M \times (1 - P_M)^{N_S}} \quad (6)$$

Данная формула позволяет нам предсказывать число начальных строк (N_{R_0}), которые будут необходимы, чтобы обнаружить случайное изменение, как функцию вероятности обнаружения ($1-P_f$), число “своих” строк, (N_S), и правило совпадения (P_M). N_{R_0} – минимизируется путем выбора правила совпадения такого, как

$$P_M \approx \frac{1}{N_S} \quad (7)$$

Предшествующий анализ позволяет нам оценивать вычислительные затраты алгоритма следующим способом. Первоначально необходимо отметить, что метод базируется на двух основных действиях: (1) генерации случайных строк фиксированной длины и (2) сравнении двух строк, для того чтобы определить удовлетворяют ли они критерию совпадения (больше чем r смежных совпадений).

Предположим, что данные действия требуют постоянного времени. Тогда, временная сложность Фазы 1 будет пропорциональна количеству строк в R_0 (то есть, N_{R_0}) и числу строк в S (то есть, N_S). Уравнение, 6 оценивает N_{R_0} основываясь на размере распознаваемого множества данных (N_S), требуемой надежности обнаружения (P_f), и специфическом правиле совпадения (P_M). Затраты на полные проверки в Фазе II будут пропорциональны числу строк в R (то есть, N_R) и числу строк в S (то есть, N_S).

ВЫВОДЫ

Основываясь на вышеупомянутом анализе, мы можем сделать несколько замечаний об алгоритме отрицательного отбора:

1. Не требует априорных знаний.
2. Он является настраиваемым: мы можем выбрать желаемую вероятность обнаружения (P_f), и затем посчитать число требуемых строк детекторов, как функцию размера N_S (строк, которые будут распознаваться), используя выражения 3 и 7. Увеличение вероятности обнаружения увеличивает вычислительные расходы, т.к. увеличиваются размеры R_0 и R . Можно выбирать желаемую вероятность обнаружения в соответствии с необходимостью

3. N_R (число строк-детекторов после проверки) не зависит от N_S (число “своих” строк) при фиксированной P_M и P_f (Уравнение 5). То есть размер множества детекторов не обязательно растет с увеличением числа распознаваемых строк. Это подразумевает, что имеется возможность распознавать очень большие объемы данных с использованием маленького множества детекторов.

4. Вероятность обнаружения увеличивается по экспоненте с числом независимых алгоритмов обнаружения.

Если N_t = число копий алгоритма в системе, тогда вероятность ошибки обнаружения (распознавания) равна $P = (P_f)^{N_t}$. Данная особенность является основным преимуществом алгоритма. Например, одна копия алгоритма обнаружения, $N_t = 1$ с 46 детекторами может распознать множество данных любого размера с вероятностью 90,6%. Используя 10 различных копий алгоритма $N_t = 10$, такой же уровень распознавания может быть получен менее, чем при наличии 4-х детекторов на каждый алгоритм.

5. Обнаружение является симметричным. Изменения в множестве детекторов обнаружены тем же самым процессом совпадения, который обнаруживает изменения в “своих”. Это означает, что, когда обнаружено изменение не существует никакого способа определить было ли изменение в своих или в детекторах. Преимущество состоит в том что “свой” осуществляет такое же распознавание детекторов, как и детекторы распознают “своих”.

6. Схема распознавания является весьма распределенной. Небольшие сегменты защищаемого объекта могут проверяться по отдельности, различные участки могут иметь независимо созданные множества детекторов для одного и того же объекта, кроме того детекторы во множестве детекторов могут управляться независимо друг от друга. Нет необходимости во взаимодействии между детекторами и множествами детекторов до тех пор пока не будет обнаружено какое-либо изменение.

7. Распознавание является локальным. Классические методы распознавания изменений (такие, например, как методы контрольной суммы) обычно требуют, чтобы весь набор данных был проверен сразу. Данный метод позволяет проверять данные маленькими порциями и в случае, когда детектор действительно находит аномалию, она мо-

жет быть локализована в пределе одной строки, которую тестирует детектор.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. K. Jerne. Towards a network theory of the immune system. *Ann. Immunol. (Inst. Pasteur)*, 125C:373{389, 1974.
2. Ronald R. Mohler, Carlo Bruni, and Alberto Gandol_. A System Approach to Immunology. *Proceedings of the IEEE*, 68(8):964{990, 1980.
3. Gerard Weisbuch. A shape space approach to the dynamics of the immune system. *Journal of Theoretical Biology*, 143(4):507-522, 1990.
4. Alan S. Perelson. Immune network theory. *Immunological Reviews*, (10):5{36, 1989.
5. Franciso J. Varela and John Stewart. Dynamics of a class of immune networks I. Global Stability of idiootype interactions. *Journal of Theoretical Biology*, 144(1):93{101, 1990.
6. Марчук Г.И. Математические модели в иммунологии. – М. Наука, 1980. – 256 с.
7. Белых Л.Н. Анализ математических моделей в иммунологии / под ред. Г.И. Марчука. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 192 с.
8. Franco Celada and Philip E. Seiden. A computer model of cellular interactions in the immune system. *Immunology Today*, 13(2):56{62, 1992.
9. Richard G. Weinand. Somatic mutation, affinity maturation and antibody repertoire: A computer model. *Journal of Theoretical Biology*, 143(3):343{382, 1990.
10. Gerard Weisbuch. A shape space approach to the dynamics of the immune system. *Journal of Theoretical Biology*, 143(4):507{522, 1990.
11. Молер Р.Р., Бруни К., Гандолфи А. Системный подход в иммунологии // ТИИЭР, 1980, том 68, № 8, с.25-56.
12. P. D'haeseleer, S. Forrest, and P. Helman. An immunological approach to change detection: algorithms, analysis, and implications. In *Proceedings of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy*, Oakland, CA, May 1996. pp.110-119.
13. Kephart, J.O., Sorkin, G.B., Swimmer, M. & White S.R. (1999), "Blueprint for a Computer Immune System" , In *Artificial Immune*

- Systems and Their Applications, D. Dasgupta (ed.), Springer-Verlag, pp.242-259
14. Aissu, H.& Mizutani H. (1996), "A Rule Acquisition for Image Processing Using Immune Mechanism", Proc. Of the 12th Fuzzy System Symposium, pp. 75-78
 15. McCoy, D.F. & Devarajan, V. (1998). "Artificial Immune Systems for Multispectral feature Extraction", Proc. Of SPIE Conf. on Algorithms for Multispectral and Hyperspectral Imagery IV, SPIE 3372, pp. 241-249.
 16. Dasgupta D. and Forrest S. Novelty detection in time series data using ideas from immunology. ISCA (th Int. Conf. on Intelligent Systems. Reno, USA, 1996.
 17. S. Forrest, S. Hofmeyr, A. Somayaji, and T. Longstaff. A sense of self for UNIX processes. In *Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Computer Security and Privacy*. IEEE Press, 1996.
 18. D. Dasgupta, K. KrishnaKumar, D. Wong, M. Berry Immunity-Based Aircraft Fault Detection System. In the proceedings of American Institute of Aeronautics and Astronautics Chicago, USA September 20-24, 2004.
 19. S. Forrest. A. S. Perelson, L. Allen, and R. Cherukuri. Self-Nonself Discrimination in a Computer. In *Proceedings of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy*, pages 202~212, Oakland, May 16-18 1994.
 20. M. Ayara, J. Timmis, R. de Lemos. L. de Castro and R. Duncan, Negative Selection: How to Generate Detectors, 1st ICARIS, 2002
 21. Fabio Gonzalez, Dipankar Dasgupta, An Immunogenetic Approach to Intrusion Detection, GECCO, 2002
 22. Fabio Gonzalez, Dipankar Dasgupta. and Luis Fernando Nino, A Randomized Real-Value Negative Selection Algorithm, ICARIS-2003.
 23. J. Kim and P. J. Bentley, Toward an artificial immune system system for network intrusion detection: An investigation of dynamic Clonal selection, in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation CEC2002*. Honolulu. 2002
 24. S. Hofmeyr and S. Forrest, Architecture for an artificial immune system, *Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 4, pp. 443-473. 2000

Получено 13.10.2005 г.

Н.Я. Гаркави, О.Н. Литвиненко, Н.Г. Нариус, А.В. Рыжов,
А.Н. Сахно

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕНДЕНЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ СОРТИРОВОК И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Постановка проблемы в общем виде

Информация, полученная в пассивном эксперименте, зачастую оказывается весьма противоречивой, что объясняется не полной наблюдаемостью исследуемого процесса. Между тем, эту информацию можно рассортировать на соответствующую и не соответствующую каким-то “нулевым” гипотезам [1,2]. Иногда имеет смысл также определить вероятность того, что экспериментальная информация соответствует какой-то (или каждой) “нулевой” гипотезе.

“Нулевые” гипотезы, интересующие практикующего врача при обработке результатов клинических испытаний фармакологических препаратов, в основном перечислены в [2]. При обработке результатов ходовых испытаний подвижного состава [3] “нулевые” гипотезы для сортировок формулируются тогда, когда ходовые испытания уже закончены, а проводить совершенно новые специализированные натурные испытания не целесообразно (частично эти сортировки оговорены в нормативной литературе [4-6]).

Постановка задачи

Данная статья посвящена формулировке критериев для алгоритмизирования сортировок накопленной в компьютере информации. Кроме того, показано, что при визуальной оценке рассортированной информации могут быть сформулированы весьма интересные выводы, которые до сортировок и без визуализации сформулировать было бы весьма затруднительно (если вообще возможно).

Изложение основного материала

При формулировании критериев сортировки положим, что в памяти компьютера хранятся реализации $\bigvee_{i=1}^N x_i(t)$ зависимостей от аргумента t какого-то показателя x , интересующего обработчика. Здесь i - номер реализации, N - количество реализаций.

© Гаркави Н.Я., Литвиненко О.Н., Нариус Н.Г., Рыжов А.В., Сахно А.Н., 2005

Предполагается, что показатель x зависит, кроме t , еще от ряда аргументов, но обработчику эти аргументы не известны. Область определения показателя x разбивается на три подмножества: $0 \leq t \leq T_1$, $T_1 < t < T_1 + T$, $T_1 + T \leq t \leq T_1 + T + T_2$. Первое и последнее подмножества – интервалы определения стабильных значений показателя, второе подмножество характеризует собственно процесс. Обычно предполагается, что $T_1 \ll T \gg T_2$. Математически критерии сортировок для достаточно простых “нулевых” гипотез [2] можно записать следующими зависимостями.

Гипотеза 1. Понижающий эффект [2] в интересующей врача постановке:

$$2 \cdot \Delta x + \max_{0 \leq t \leq T_2} x_i(t + T_1 + T) < \max_{0 \leq t \leq T_1} x_i(t). \quad (1)$$

Инженера больше интересует понижающий эффект в постановке

$$2 \cdot \Delta x + \max_{0 \leq t \leq T_2} x_i(t + T_1 + T) < \min_{0 \leq t \leq T_1} x_i(t) \quad (2)$$

и понижающий в среднем эффект

$$2 \cdot \Delta x + \frac{1}{T_2} \int_{T_1+T}^{T_1+T+T_2} x_i(t) \cdot dt < \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x_i(t) \cdot dt. \quad (3)$$

В выражениях (1)-(3) и дальше Δx - допустимая погрешность измерения величин x_i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Гипотеза 2. Повышающие [2] эффекты соответственно описываются выражениями

$$\min_{0 \leq t \leq T_2} x_i(t + T_1 + T) > 2 \cdot \Delta x + \min_{0 \leq t \leq T_1} x_i(t), \quad (4)$$

$$\min_{0 \leq t \leq T_2} x_i(t + T_1 + T) > 2 \cdot \Delta x + \max_{0 \leq t \leq T_1} x_i(t), \quad (5)$$

$$\frac{1}{T_2} \int_{T_1+T}^{T_1+T+T_2} x_i(t) \cdot dt > 2 \cdot \Delta x + \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x_i(t) \cdot dt. \quad (6)$$

Гипотеза 3. Нормализующий эффект [2] в интересующей врача постановке соответствует выражению

$$\left(\left(\bigvee_{0 \leq t \leq T_1} x_i(t) > x_{\max} + \Delta x \right) \vee \left(\bigvee_{0 \leq t \leq T_1} x_i(t) < x_{\min} - \Delta x \right) \right) \wedge \left(x_{\min} + \Delta x \leq \bigvee_{0 \leq t \leq T_2} x_i(t + T_1 + T) \leq x_{\max} - \Delta x \right). \quad (7)$$

Здесь $[x_{\min}, x_{\max}]$ - интервал “нормальных” (технологически допустимых) значений величин x_i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Нормализующий в среднем эффект соответствует выражению

$$\left(\left(\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x_i(t) \cdot dt > x_{\max} + \Delta x \right) \vee \left(\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} x_i(t) \cdot dt < x_{\min} - \Delta x \right) \right) \wedge \left(x_{\min} + \Delta x \leq \frac{1}{T_2} \int_{T_1+T}^{T_1+T+T_2} x_i(t) \cdot dt \leq x_{\max} - \Delta x \right). \quad (8)$$

Из достаточно простых интересующих инженера тенденций можно также назвать “стабильность” (гипотезу 4)

$$x_{\min} - \Delta x \leq \bigvee_{0 \leq t < \infty} x_i(t) \leq x_{\max} + \Delta x, \quad (9)$$

и “насыщение” (гипотезу 5)

$$x_m - \Delta x \leq \bigvee_{0 \leq t \leq T_2} x_i(t + T) \leq x_m + \Delta x. \quad (10)$$

В выражении (10) x_m - “насыщающее” значение величин x_i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Более сложные критерии для сортировок формулируются в каждом конкретном случае.

Вероятность (частость) подтверждения гипотезы P_r определится зависимостью

$$P_r = \frac{n}{N}, \quad (11)$$

где n - количество реализаций, в которых гипотеза “г” подтвердилась.

Продemonстрируем выше сказанное на примерах.

Пример 1. Клинические испытания фармакологического препарата (чтобы избежать ненужной рекламы, диагноз и наименование лекарства здесь не указываются).

Каждому больному во взаимно однозначное соответствие поставлен массив с зависимостью температуры больного от длительности лечения. Ниже приводится формат этого массива.

Первая строка массива – идентификатор больного. Обычно идентификатором является фамилия, имя, отчество и год рождения больного.

Затем в массиве следуют строки (по три элемента в каждой строке), соответствующие суткам болезни. В каждой сутке должно быть три измерения температуры. Температура измеряется с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$ (при этом $\Delta x=0$). Одно два или даже все три измерения в каких-то сутках могут быть пропущены. Тогда на месте пропущенного измерения ставится символ "#". В первых и последних сутках хотя бы одно измерение должно быть обязательно. Каждый элемент информационной части массива обозначим $x_{i,j,L}$, где i - идентификатор больного, j - сутки болезни (для первой строки $j=1$, для второй строки $j=2$, для последних суток $j=J_i$), $L \in [1,2,3]$ - порядковый номер измерения в течение суток, J_i - номер последней строки в i -м массиве. $L=1$ соответствует "утреннему", $L=2$ соответствует "дневному", $L=3$ соответствует "вечернему" измерению температуры.

Таким образом, в выражениях (1), (4), (7) времени T_1 соответствуют первые сутки (одно, два или три измерения температуры): $T_1=1$ сутки. Время T_2 определим следующим правилом. Если в последних сутках нет всех трех измерений, то время T_2 - это двое последних суток; если все три измерения в последних сутках наличествуют, то T_2 - это одни последние сутки:

$$T_2 = \begin{cases} 1 \Leftarrow \bigvee_{L=1}^3 x_{i,J_i,L} \neq "\#", \\ 2 \Leftarrow \bigwedge_{L=1}^3 x_{i,J_i,L} = "\#". \end{cases}$$

Время T определяется длиной массива J_i : $T = J_i - T_1 - T_2$.

На рис.1 приведена информация о 18-и больных, выведенная в виде поля точек. Ось абсцисс – длительность лечения, ось ординат – температура больного в каждом измерении температуры (если данное измерение не было пропущено).

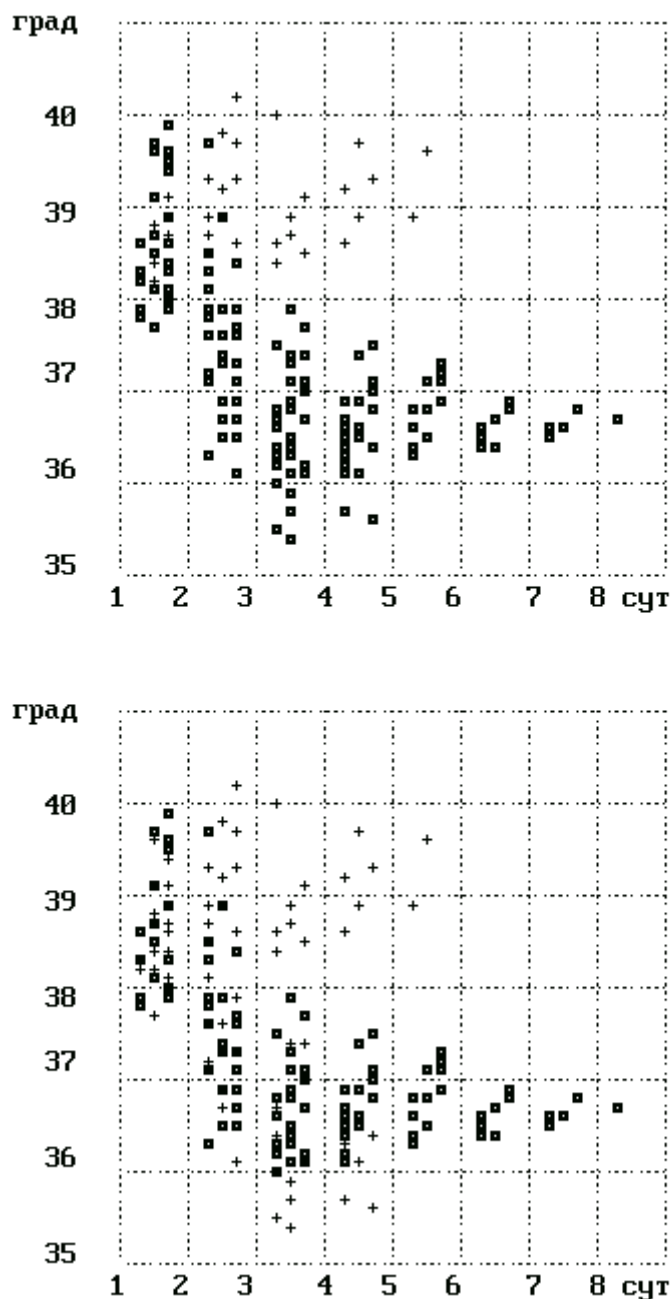


Рисунок 1 Сверху – тенденция “понижения”, внизу – тенденция “нормализации”

Перед выводом информация была рассортирована на укладываемую и не укладываемую в каждую тенденцию (см. (1), (4),

(7)). На рис.1 квадратиками обозначены реализации, удовлетворяющие критерию (1) (левый рисунок) и критерию (7) (правый рисунок), а крестиками – реализации, критерию (1) (левый рисунок) и критерию (7) (правый рисунок) не удовлетворяющие. Аналогичный рисунок можно построить и для информации, удовлетворяющей и не удовлетворяющей критерию (4).

Из рис.1 можно сделать следующий вывод. Лекарственный препарат обладает понижающим действием, но помогает не всем (14 из 18-и, т.е. $\approx 78\%$). Если на третьи сутки лечения понижающего эффекта не было, то дальнейшее лечение этим препаратом бессмысленно. Препарат в некоторых случаях имеет нормализующий эффект (10 из 18-и, т.е. $\approx 56\%$), но возможны не только случаи, когда препарат не действует (4 из 18-и, т.е. $\approx 22\%$), но и случаи, когда действие препарата остается понижающим ниже нормы (4 из 18-и, т.е. $\approx 22\%$). Эффекта, понижающего температуру до нормы или ниже нормы, удавалось достичь не более, чем за пять суток ($\max_i T = 5$).

При сортировках по критерию (7) полагали $x_{\min} = 36,0^\circ$, $x_{\max} = 37,0^\circ$.

Пример 2. Во время ходовых испытаний мотор-вагонного подвижного состава с датчиков в компьютер в течение всего времени испытаний с различными частотами квантования вводится [7] разнообразная информация (в том числе с частотой квантования 100 Гц вводится информация об изменении во времени коэффициентов вертикальной динамики $K_{дв}$ рессорного подвешивания экипажа [3,6]). Согласно требованиям нормативной литературы [6] введенная информация разбивается на реализации длительностью τ . Каждой реализации ставится в соответствие тип пройденного участка пути (прямая, кривая, стрелки), средняя скорость на этом участке, оценка состояния пути ("отл", "хор", "уд", "неуд") и т.п. Длительность τ определяется типом участка пути. На прямых участках $10 \leq \tau \leq 15$ секунд. В кривых и в стрелках начало и конец реализации должны быть записаны соответственно на предшествующей и последующей прямой. Таким образом, длительность реализаций в кривых и в стрелках может варьироваться в весьма широких пределах. В каждой реализации определяется наибольший по модулю $K_{дв}$. Документ [8] нормирует

максимально допустимое значение $K_{ДВ}$ на пути отличного, хорошего и удовлетворительного содержания. Если по результатам испытаний окажется, что $K_{ДВ}$ в каких-то реализациях превышал допустимый уровень и оценка состояния данного участка пути выше “неуд”, то предприятию-изготовителю будет предложено либо устранить этот недостаток, либо понизить заявленную конструкционную скорость.

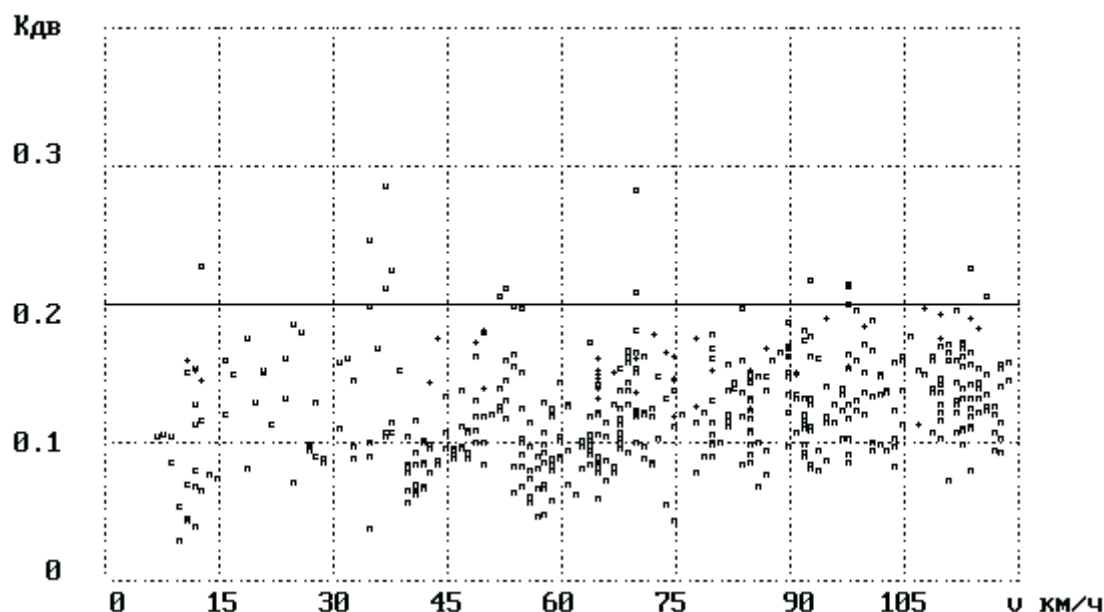


Рисунок 2 Результаты ходовых испытаний железнодорожного экипажа.

На рис.2 приведено поле точек, соответствующее зависимости $K_{ДВ}$ от скорости движения. Символом “о” обозначены $K_{ДВ}$, зафиксированные на пути неудовлетворительного содержания. Символом “п” обозначены $K_{ДВ}$, зафиксированные в прямых; символом “+” – в кривых; символом “с” – в прямых стрелках; символом “∪” – в стрелках на боковой путь. Из рис.2 следует, что $K_{ДВ}$ остается нормативным в прямых участках пути, в кривых и в прямых стрелках во всем диапазоне разрешенных для данных участков скоростей (не превышающих конструкционную скорость 120 км/час). Однако, $K_{ДВ}$ превышает нормативный уровень $x_{\max} = 0,2$ в стрелках на боковой путь при скоростях, больших $v = 30$ км/час. Таким образом, в результате испытаний данному типу экипажей будет сформулировано эксплуатационное ограничение скоростей по стрелкам на боковой путь 25 км/час. Пре-

вышение нормативного уровня $K_{дв} \ x_{\max} = 0,2$ на пути с оценкой состояния "неуд" браковочным признаком экипажа не является.

При сортировках каждой (i -той) реализации ставились в соответствие x_i - наибольшее по модулю значение $K_{дв}$, v_i - средняя скорость на данном участке, тип участка $t_i \in ["п", "к", "я", "б"]$ ("п" – прямой участок пути, "к" – кривая, "я" – прямые стрелки, "б" – стрелки на боковой путь) и оценка состояния пути $ц_i \in ["отл", "хор", "уд", "неуд"]$. Символ, которым на рис.2 обозначены соответствующие x_i , определяется следующими правилами

$$S(x_i) = \begin{cases} "о" \Leftarrow ц_i = "неуд", \\ "п" \Leftarrow (ц_i \neq "неуд") \wedge (t_i = "п"), \\ "+" \Leftarrow (ц_i \neq "неуд") \wedge (t_i = "к"), \\ "с" \Leftarrow (ц_i \neq "неуд") \wedge (t_i = "я"), \\ "\cup" \Leftarrow (ц_i \neq "неуд") \wedge (t_i = "б"). \end{cases}$$

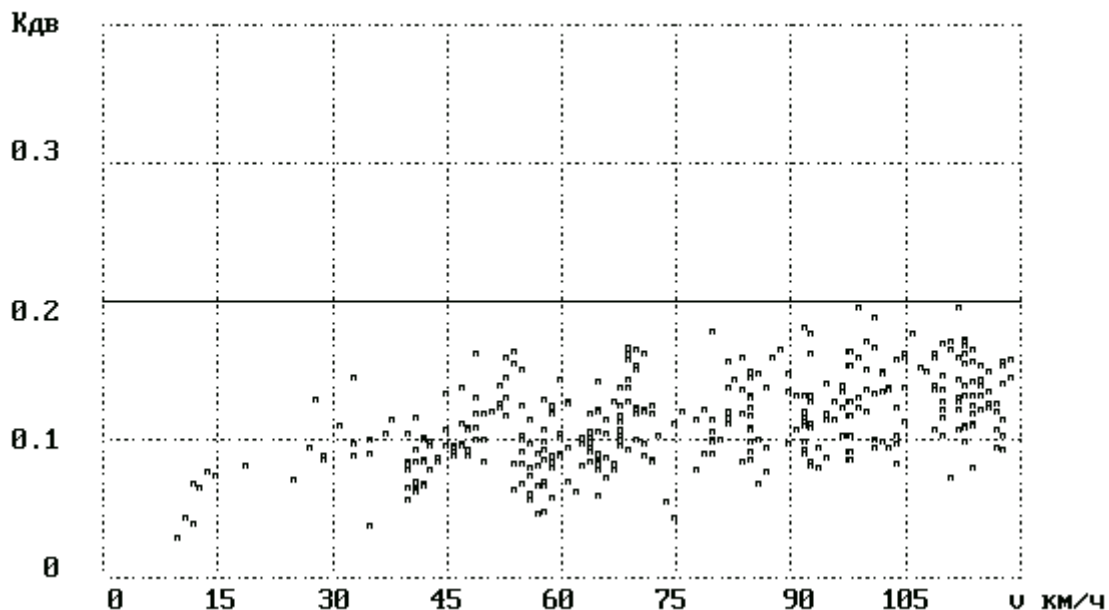


Рисунок 3. Зависимость $K_{дв}$ от скорости испытательного поезда на прямых участках пути отличного, хорошего и удовлетворительного содержания

Результатом сортировки $\forall_i x_i$ на удовлетворение гипотезы 4 при $x_{\min} = 0$ и $x_{\max} = 0,2$, если $S(x_i) \neq "о"$, будет массив, каждый элемент которого должен содержать значения $x_i > x_{\max}$, $S(x_i)$, v_i . Выведенная

на рис.2 информация (зависимость x_i от v_i с учетом $S(x_i)$ и линия $y(v) = x_{\max}$) в данном случае оказывается более информативной, чем поле точек, не удовлетворяющих гипотезе 4. На рис. 3 выведено поле точек, соответствующее $S(x_i) = "п"$. Согласно рис.3 $K_{ДВ}$ имеет тенденцию к росту с ростом скорости (подтверждается гипотеза 2, зависимость (6) при $T_1 \geq 15$ км/час, $T_2 = 15$ км/час, $T > 0$, $\Delta x = 0$).

Вывод

Сортировки с последующей визуализацией накопленной в экспериментах информации являются мощным средством идентификации тенденций исследуемых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александровская Л.Н., Лисов А.А., Смирнов В.В. Идентификация моделей деградационных процессов старения при эксплуатации изделий. // Методы менеджмента качества. Надежность и контроль качества. 7'99. – М.: РИА “Стандарты и качество”, 1999. – С.49-54.
2. Сахно А.Н. Профилактика послеоперационных осложнений у больных хроническими заболеваниями желчевыводящих путей. // Диссертация на соискание научной степени кандидата медицинских наук. – Харьков: Харьковский институт усовершенствования врачей, 1985.
3. Блохин Е.П., Манашкин Л.А., Данович В.Д., Коротенко М.Л., Грановский Р.Б., Мямлин С.В., Гаркави Н.Я., Федоров Е.Ф. Обработка результатов ходовых испытаний железнодорожных вагонов с целью определения их динамических качеств. // Вісті Академії інженерних наук України. Спецвипуск. – “Машинобудування”. №4(17), 2002. – С.52-61.
4. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. - 101 с.
5. СТ ССФЖТ ЦТ 15-98. Стандарт системы сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Тяговый подвижной состав. Типовая методика динамико-прочностных испытаний локомотивов. - М.: МПС России. Введен в действие 15.02.99 г. указанием МПС России №Г-165у. - 26 с.
6. СТ ССФЖТ ЦТ 16-98. Стандарт системы сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Тяговый подвижной состав.

- Типовая методика динамико-прочностных испытаний электропоездов и дизель-поездов. - М.: МПС России. Введен в действие 17.11.99 г. указанием МПС России №А-2641у. - 25 с.
7. Блохин Е.П., Мямлин С.В., Грановский Р.Б., Горобец В.Л., Глухов В.В., Гаркави Н.Я., Федоров Е.Ф. О вводе в компьютер информации от датчиков при натурных испытаниях железнодорожного подвижного состава. // Вісті Академії інженерних наук України. Спецвипуск - "Машинобудування". №4(17), 2002. - С.19-28.
8. Типовая методика испытаний подвижного состава по воздействию на путь после изготовления или перед вводом в эксплуатацию. - М.: ВНИИЖТ МПС (ИЦЖТ), 1990. - 20 с.

Получено 24.10.2005 г.

ИЗГИБ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА И УПРУГО ПЛАСТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ АРМАТУРЫ

Рассматривается чистый изгиб железобетонного элемента прямоугольного поперечного сечения с двойным армированием (см.рис.1). Нелинейная ползучесть бетона описывается нелинейно-наследственным уравнением В.М.Бондаренко [1]. При построении расчетной методики принимается, что для комплексного сечения справедлив закон плоских сечений и работа бетона на растяжении по сравнению с работой на сжатие не учитывается [1,2,3]. Упругопластическая работа арматурных стерженьков описывается диаграммой А.А.Ильюшина [4].

Для бетона при длительном загрузении диаграмму деформирования принимаем в форме [1]

$$\varepsilon_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{E_{bt}} S_1 \left(\frac{\sigma_{bt}}{R_{bt}} \right) - \int_{t_0}^t \sigma_{bt} S_2 \left(\frac{\sigma_{bt}}{R_{bt}} \right) \frac{\partial C_{t,\tau}^*}{\partial \tau} d\tau + \varepsilon_y \quad (1)$$

Здесь S_1 и S_2 соответственно функции нелинейности мгновенного и длительного деформирования бетона при сжатии и по рекомендациям [1] их можно принимать в виде

$$S_i \equiv 1 + \eta_i \left(\frac{\sigma_{bt}}{R_{bt}} \right)^{m_i}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

где η_i и m_i экспериментально устанавливаемые безразмерные параметры нелинейности.

ε_y – деформация усадка, которая может быть определена по зависимостям Г.Д. Вищневцекого [5]:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y^{np} (\exp(-b_1 t_0) - \exp(-b_1 t)), \quad (3)$$

где параметр b_1 в зависимости от температуры твердения бетона рекомендуется определять по зависимости $b_1 = 0,003 \exp(-0,06T)$, где T – температура твердения бетона в $^{\circ}\text{C}$.

Если принимать меру ползучести бетона по предложениям И.Е. Прокоповича и И.И. Улицкого [6] в виде

$$C_{t,\tau} = C_0 [1 - \exp(-\gamma(t - \tau))] + A_0 [\exp(-\gamma_2 \tau) - \exp(-\gamma_2 t)] \quad (4)$$

то интегральное уравнение деформирования бетона (1) можно представить в следующей адекватной дифференциальной форме [7].

Для чего предварительно зависимость (1) приведем к безразмерной форме

$$\varepsilon_{bt} = \frac{R_{bt}}{E_{bt}} \theta_t S_1(\theta_k) - \int_{t_0}^t R_{bt} \theta_{b\tau} S_2(\theta_{b\tau}) \frac{\partial C_{t,\tau}^*}{\partial \tau} d\tau \quad (5)$$

Тогда учитывая, что [8] $C_{t,\tau}^* = \frac{1}{E_\tau} - \frac{1}{E_t} + C_{t,\tau}$ окончательно

получим следующую дифференциальную зависимость

$$\begin{aligned} \ddot{\varepsilon}_{bt} + \gamma_1 \dot{\varepsilon}_{bt} = & \ddot{\varepsilon}_{yt} + \gamma_1 \dot{\varepsilon}_{yt} + A_1(t) [S_1(\theta_{bt}) + \theta_{bt} S'_1(\theta_{bt})] \ddot{\theta}_{bt} + \\ & + A_1(t) [2S'_1(\theta_{bt}) + \theta_{bt} S''_1(\theta_{bt})] \dot{\theta}_{bt}^2 + A_2(t) [S_1(\theta_{bt}) + \theta_{bt} S'_1(\theta_{bt})] \dot{\theta}_{bt} + \\ & + A_3(t) [S_2(\theta_{bt}) + \theta_{bt} S'_2(\theta_{bt})] \dot{\theta}_{bt} + A_4(t) \theta_{bt} S_1(\theta_{bt}) + A_5(t) \theta_{bt} S_2(\theta_{bt}) \end{aligned} \quad (6)$$

Соответствующие начальные условия при $t=t_0$ имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_{bt_0} = & A_1(t_0) \theta_{bt_0} S_1(\theta_{bt_0}) + \varepsilon_{yt_0}, \\ \dot{\varepsilon}_{bt_0} = & A_1(t_0) [S_1(\theta_{bt_0}) + \theta_{bt_0} S'_1(\theta_{bt_0})] \dot{\theta}_{bt_0} + \\ & + A_6(t_0) \theta_{bt_0} S_1(\theta_{bt_0}) + A_7(t_0) \theta_{bt_0} S_2(\theta_{bt_0}) + \dot{\varepsilon}_{yt_0} \end{aligned} \quad (7)$$

Входящие в вышеприведенные зависимости функции времени имеют вид

$$\begin{aligned} A_1(t) = & \frac{R_{bt}}{E_{bt}}, \quad A_2(t) = \frac{\gamma_1 R_{bt}}{E_{bt}} + \frac{2R'_{bt}}{E_{bt}} - \frac{2R_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2}, \\ A_3(t) = & \frac{R_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2} + R_{bt} C_0 \gamma_1 + A_0 R_{bt} \gamma_2 \exp(-\gamma_2 t), \\ A_4(t) = & \frac{\gamma_1 R'_{bt}}{E_{bt}} - \frac{\gamma_1 R_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2} + \frac{R''_{bt}}{E_{bt}} - \frac{2R'_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2} - \frac{R_{bt} E''_{bt}}{E_{bt}^2} + \frac{2R_{bt} E'^2_{bt}}{E_{bt}^3}, \\ A_5(t) = & \frac{\gamma_1 R_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2} + R_{bt} C_0 \gamma_1^2 + R_{bt} A_0 \gamma_1 \gamma_2 \exp(-\gamma_2 t) + \frac{R'_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2} \\ & + \frac{R_{bt} E''_{bt}}{E_{bt}^2} - \frac{2R_{bt} E'^2_{bt}}{E_{bt}^3} + R'_{bt} C_0 \gamma_1 + A_0 R'_{bt} \gamma_2 \exp(-\gamma_2 t) - A_0 \gamma_2^2 R_{bt} \exp(-\gamma_2 t), \\ A_6(t) = & \frac{R'_{bt}}{E_{bt}} - \frac{R_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2}, \quad A_7(t) = \frac{R_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2} + R_{bt} C_0 \gamma_1 + R_{bt} A_0 \gamma_2 \exp(-\gamma_2 t) \\ A_7(t) = & \frac{R_{bt} E'_{bt}}{E_{bt}^2} + R_{bt} C_0 \gamma_1 + R_{bt} A_0 \gamma_2 \exp(-\gamma_2 t). \end{aligned} \quad (8)$$

Диаграмму деформирования арматурных стержней примем в форме [4]

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s [1 - \omega_s(\varepsilon_s)] \quad (9)$$

где ω_s функция нелинейности.

Покажем распределение нормальных напряжений по высоте сечения. Согласно исследованиям [1,2] распределение нормальных напряжений по высоте сечения может быть аппроксимирована в виде

$$\sigma_{bz} = \sigma_{bt} \left(\frac{z + x - 0.5}{x} \right)^n \quad (10)$$

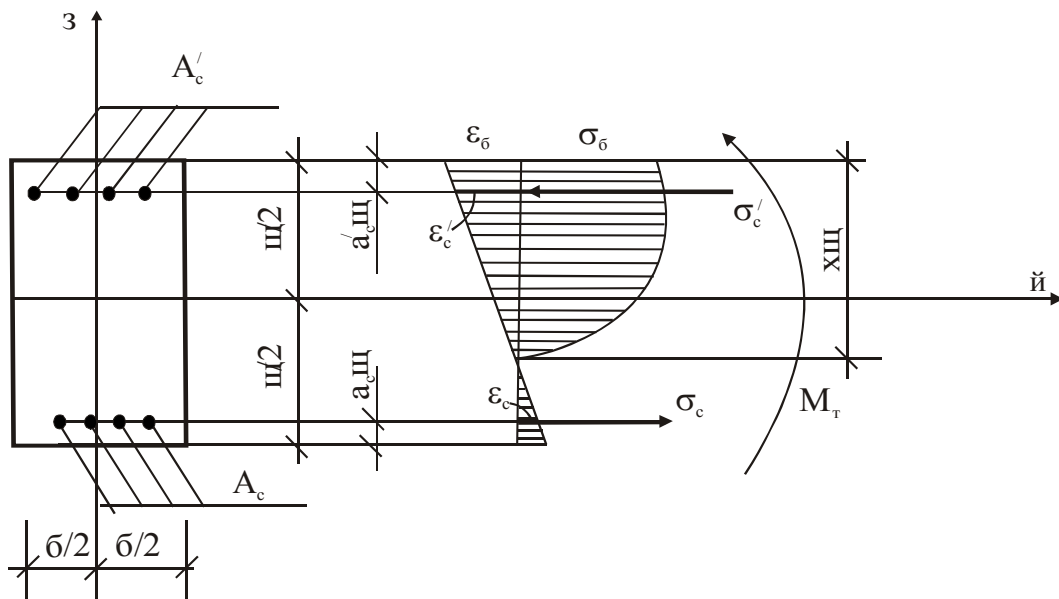


Рис. 1

Тогда на основании формул сопротивления материалов для главного вектора и главного момента эпюры нормальных сжимающих напряжений в бетоне найдем

$$N_b = bh\sigma_{bt} \frac{x}{n+1}; \quad M_b = bh^2\sigma_{bt} \left[\frac{x^2}{n+2} - \frac{x^2 - 0.5x}{n+1} \right] \quad (11)$$

Закон плоских сечений позволяет выразить деформации арматурных стержней через деформацию крайнего сжатого волокна бетона ε_b и высоты сжатой зоны x :

$$\varepsilon'_s = \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - a'_s); \quad \varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - 1 + a_s) \quad (12)$$

Тогда для главного вектора и главного момента напряжений в арматурных стержнях найдем

$$\begin{aligned}
N_s &= E'_s A'_s \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - a'_s) [1 - \omega'_s(\varepsilon_{bt}, x)] + E_s A_s \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - 1 + a_s) [1 - \omega_s(\varepsilon_{bt}, x)] \\
M_s &= E'_s A'_s h(0,5 - a'_s) \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - a'_s) [1 - \omega'_s(\varepsilon_{bt}, x)] - \\
&\quad - E_s A_s h(0,5 - a_s) \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - 1 + a_s) [1 - \omega_s(\varepsilon_{bt}, x)]
\end{aligned} \tag{13}$$

На основании вышеприведенных зависимостей составим уравнения равновесия для рассматриваемого сечения

$$\begin{aligned}
\theta_{bt} \frac{x}{n+1} + \mu'_{st} \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - a'_s)(1 - \omega'_s) + \mu_{st} \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - 1 + a_s)(1 - \omega_s) &= 0 \\
\theta_{bt} \left(\frac{x^2}{n+2} - \frac{x^2 - 0,5x}{n+1} \right) + \mu'_{st} (0,5 - a'_s) \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - a'_s)(1 - \omega'_s) - \\
-\mu_{st} (0,5 - a_s) \frac{\varepsilon_{bt}}{x} (x - 1 + a_s)(1 - \omega_s) &= \bar{M}_t
\end{aligned} \tag{14}$$

Здесь

$$\mu'_{st} = \frac{E'_s A'_s}{R_{bt} b h}; \mu_{st} = \frac{E_s A_s}{R_{bt} b h}; \bar{M}_t = \frac{M_t}{R_{bt} b h^2}$$

Так как основной закон деформирования бетона дифференциальное уравнение второго порядка про дифференцируем уравнения равновесия также два раза по времени

$$\begin{aligned}
\dot{\theta}_{bt} \frac{x}{n+1} - \frac{\theta_{bt} x}{(n+1)^2} \cdot \dot{n} + \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \theta_{bt} \frac{x}{n+1} + \left[\frac{\theta_{bt}}{n+1} + \mu'_{st} \varepsilon_{bt} \frac{a'_s}{x^2} (1 - \omega'_s) - \right. \\
\left. - \mu'_{st} \varepsilon_{bt} \left(1 - \frac{a'_s}{x} \right) \omega'_{sx} + \mu_{st} \varepsilon_{bt} \frac{1 - a_s}{x^2} (1 - \omega_s) - \mu_{st} \varepsilon_{bt} \left(1 - \frac{1 - a_s}{x} \right) \omega_{sx} \right] \cdot \dot{x} + \\
+ \left[\mu'_{st} \left(1 - \frac{a_s}{x} \right) (1 - \omega'_s - \varepsilon_{bt} \omega'_{s\varepsilon}) + \mu_{st} \left(1 - \frac{1 - a_s}{x} \right) (1 - \omega_s - \varepsilon_{bt} \omega_{s\varepsilon}) \right] \cdot \dot{\varepsilon}_{bt} = 0, \\
\dot{\theta}_{bt} \left(\frac{x^2}{n+2} - \frac{x^2 - 0,5x}{n+1} \right) + \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \theta_{bt} \left(\frac{x^2}{n+2} - \frac{x^2 - 0,5x}{n+1} \right) + \\
+ \left[\theta_{bt} \left(\frac{2x}{n+2} - \frac{2x - 0,5}{n+1} \right) + \mu'_{st} (0,5 - a'_s) \varepsilon_{bt} \frac{a'_s}{x} (1 - \omega'_s) - \right. \\
\left. - \mu'_{st} (0,5 - a'_s) \varepsilon_{bt} \left(1 - \frac{a'_s}{x} \right) \omega'_{sx} - \mu_{st} (0,5 - a_s) \varepsilon_{bt} \frac{1 - a_s}{x^2} (1 - \omega_s) + \right. \\
\left. + \mu_{st} (0,5 - a_s) \varepsilon_{bt} \left(1 - \frac{1 - a_s}{x} \right) \omega_{sx} \right] \dot{x} + \left[\mu'_{st} (0,5 - a'_s) \left(1 - \frac{a'_s}{x} \right) \times \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times (1 - \omega'_s - \varepsilon_{bt} \omega'_{s\varepsilon}) - \mu_{st} (0,5 - a_s) \left(1 - \frac{1 - a_s}{x} \right) \times \\ & \times (1 - \omega_s - \varepsilon_{bt} \omega_{s\varepsilon}) \dot{\varepsilon}_{bt} + \theta_{bt} \left(\frac{x^2 - 0,5x}{(n+1)^2} - \frac{x^2}{(n+2)^2} \right) \dot{n} = \dot{\bar{M}}_t + \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \bar{M}_t \end{aligned} \quad (15)$$

Чтобы не загромождать запись более сокращению вышеприведенные зависимости представим в виде

$$\begin{aligned} & \dot{\theta}_{bt} \frac{x}{n+1} - \frac{\theta_{bt} x}{(n+1)^2} \cdot \dot{n} + \mu_1 \dot{x} + \mu_2 \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_3 = 0 \\ & \dot{\theta}_{bt} \left(\frac{x^2}{n+2} - \frac{x^2 - 0,5x}{n+1} \right) + \theta_{bt} \left(\frac{x^2 - 0,5x}{(n+1)^2} - \frac{x^2}{(n+2)^2} \right) \dot{n} + \\ & + \mu_4 \dot{x} + \mu_5 \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_6 = \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \bar{M}_t + \dot{\bar{M}}_t \end{aligned} \quad (16)$$

Вновь введенные функций μ_i ясны из вышеприведенных зависимостей.

Продифференцировать еще раз зависимости (16) имеем

$$\begin{aligned} & \ddot{\theta}_{bt} \frac{x}{n+1} - \frac{\theta_{bt} x}{(n+1)^2} \cdot \ddot{n} + \mu_1 \ddot{x} + \mu_2 \ddot{\varepsilon}_{bt} + \dot{\theta}_{bt} \frac{\dot{x}}{n+1} - 2\dot{\theta}_{bt} \frac{x}{(n+1)^2} \dot{n} - \frac{\theta_{bt} \dot{x}}{(n+1)^2} \dot{n} + \\ & + 2\frac{\theta_{bt} x}{(n+1)^3} \dot{n}^2 + (\mu_{1x} \dot{x} + \mu_{2x} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{3x}) \dot{x} + (\mu_{10} \dot{x} + \mu_{20} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{30}) \dot{\theta}_{bt} + \\ & + (\mu_{1\varepsilon} \dot{x} + \mu_{2\varepsilon} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{3\varepsilon}) \dot{\varepsilon}_{bt} + (\mu_{1n} \dot{x} + \mu_{2n} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{3n}) \dot{n} + \mu_{1t} \dot{x} + \mu_{2t} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{3t} = 0, \\ & \ddot{\theta}_{bt} \left(\frac{x^2}{n+2} - \frac{x^2 - 0,5x}{n+1} \right) + \theta_{bt} \left(\frac{x^2 - 0,5x}{(n+1)^2} - \frac{x^2}{(n+2)^2} \right) \ddot{n} + \\ & + \mu_4 \ddot{x} + \mu_5 \ddot{\varepsilon}_{bt} + \dot{\theta}_{bt} \left(\frac{2x}{n+2} - \frac{2x - 0,5}{n+1} \right) \dot{x} + 2\dot{\theta}_{bt} \dot{n} \left(\frac{x^2 - 0,5x}{(n+1)^2} - \frac{x^2}{(n+2)^2} \right) + \\ & + \theta_{bt} \left(\frac{2x - 0,5}{(n+1)^2} - \frac{2x}{(n+2)^2} \right) \dot{x} \dot{n} + 2\theta_{bt} \dot{n}^2 \left(\frac{x^2}{(n+2)^3} - \frac{x^2 - 0,5x}{(n+1)^3} \right) + \\ & + (\mu_{4x} \dot{x} + \mu_{5x} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{6x}) \dot{x} + (\mu_{40} \dot{x} + \mu_{50} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{60}) \dot{\theta}_{bt} + \\ & + (\mu_{4\varepsilon} \dot{x} + \mu_{5\varepsilon} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{6\varepsilon}) \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{4t} \dot{x} + \mu_{5t} \dot{\varepsilon}_{bt} + \mu_{6t} = \ddot{\bar{M}}_t + \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \dot{\bar{M}}_t + \\ & + \left(\frac{R''_{bt}}{R_{bt}} - \frac{2R'^2_{bt}}{R_{bt}^2} \right) \bar{M}_t, \end{aligned} \quad (17)$$

В вышеприведенных зависимостях индексы у вновь введенных функциях означают дифференцирование по этим индексам.

Согласно исследованиям [1] параметр нелинейности n также выражается через напряжение крайнего сжатого волокна бетона

$$n = 1 - f_* \theta_{bt}^{m_*} \quad (18)$$

Продифференцируем эту зависимость также в два раза по времени

$$\begin{aligned} \dot{n} &= -f_* m_* \theta_{bt}^{m_*-1} \dot{\theta}_{bt}, \\ \ddot{n} &= -f_* m_* (m_* - 1) \theta_{bt}^{m_*-2} \dot{\theta}_{bt}^2 - f_* m_* \theta_{bt}^{m_*-1} \ddot{\theta}_{bt} \end{aligned} \quad (19)$$

Полученные зависимости (5), (17) и (19) представляют собой полную систему нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами для исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента.

Более сокращенно полученную систему можно представить в виде

$$\begin{cases} D_{11} \ddot{\theta}_{bt} - \ddot{\varepsilon}_{bt} = F_1 \\ D_{21} \ddot{\theta}_{bt} + \mu_2 \ddot{\varepsilon}_{bt} - D_{22} \ddot{n} + \mu_1 \ddot{x} = F_2 \\ D_{31} \ddot{\theta}_{bt} + \mu_3 \ddot{\varepsilon}_{bt} + D_{32} \ddot{n} + \mu_4 \ddot{x} = F_3 \\ D_{41} \ddot{\theta}_{bt} + \ddot{n} = F_4 \end{cases} \quad (20)$$

Дальнейшие выкладки представим в матричной форме, для чего введем следующий вектор неизвестных $\{Y\}$, элементами которых являются параметры напряженно-деформированного состояния армированного сечения.

$$\{Y\} = \{y_1, y_2, \dots, y_8\}^T = \{\theta_{bt}, n, \varepsilon_{bt}, x, \dot{\theta}_{bt}, \dot{n}, \dot{\varepsilon}_{bt}, \dot{x}\}^T \quad (21)$$

Тогда полученную систему (20) можно представить в следующем виде

$$\{\dot{Y}\} = \{B(\{Y\})\}. \quad (22)$$

Здесь

$$\begin{aligned} B_i &= y_{i+4}; \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ B_5 &= \frac{\mu_4 (\mu_2 F_1 + F_2 + D_{22} F_4) - \mu_1 (F_3 + \mu_5 F_1 - D_{32} F_4)}{\mu_4 (D_{21} + \mu_2 D_{11} + D_{22} D_{41}) - \mu_1 (D_{31} + \mu_5 D_{11} - D_{32} D_{41})}, \\ B_6 &= F_4 - D_{41} B_5; B_7 = D_{11} B_6 - F_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_8 &= \frac{(D_{21} + \mu_2 D_{11} + D_{22} D_{41})(F_3 + \mu_5 F_1 - D_{32} F_4)}{\mu_4 (D_{21} + \mu_2 D_{11} + D_{22} D_{41}) - \mu_1 (D_{31} + \mu_5 D_{11} - D_{32} D_{41})} - \\
 &- \frac{(D_{31} + \mu_5 D_{11} - D_{32} D_{41})(\mu_2 F_1 + D_{22} F_4 + F_2)}{\mu_4 (D_{21} + \mu_2 D_{11} + D_{22} D_{41}) - \mu_1 (D_{31} + \mu_5 D_{11} - D_{32} D_{41})} \\
 \mu_1 &= \frac{y_1}{y_2 + 1} + \mu'_{st} y_3 \frac{a'_s}{y_4^2} (1 - \omega'_s) - \mu'_{st} y_3 (1 - \frac{a'_s}{y_4}) \omega'_{sx} + \\
 &+ \mu_{st} y_3 \frac{1 - a_s}{y_4^2} (1 - \omega_s) - \mu_{st} y_3 (1 - \frac{a_s}{y_4}) \omega_{sx} \\
 \mu_2 &= \mu'_{st} (1 - \frac{a'_s}{y_4}) (1 - \omega'_s - y_3 \omega'_{s\varepsilon}) + \mu_{st} (1 - \frac{a_s}{y_4}) (1 - \omega_s - y_3 \omega_{s\varepsilon}) \\
 \mu_3 &= \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \cdot \frac{y_1 y_4}{y_2 + 1} \\
 \mu_4 &= y_1 \left(\frac{2y_4}{y_2 + 2} - \frac{2y_4 - 0,5}{y_2 + 1} \right) + \mu'_{st} (0,5 - a'_s) y_3 \frac{a'_s}{y_4^2} (1 - \omega'_s) - \\
 &- \mu'_{st} (0,5 - a'_s) y_3 (1 - \frac{a'_s}{y_4}) \omega'_{sx} - \mu_{st} (0,5 - a_s) y_3 \frac{1 - a_s}{y_4^2} (1 - \omega_s) + \\
 &+ \mu_{st} (0,5 - a_s) y_3 (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) \omega_{sx} \\
 \mu_5 &= \mu'_{st} (0,5 - a'_s) (1 - \frac{a_s}{y_4}) (1 - \omega'_s - y_3 \omega'_{s\varepsilon}) - \\
 &- \mu_{st} (0,5 - a_s) (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) (1 - \omega_s - y_3 \omega_{s\varepsilon}), \\
 \mu_6 &= \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} y_1 \left(\frac{y_4^2}{y_2 + 2} - \frac{y_4^2 - 0,5 y_4}{y_2 + 1} \right), \\
 \mu_{10} &= \frac{1}{y_2 + 1}, \\
 \mu_{1x} &= -2\mu'_{st} y_3 \frac{a'_s}{y_4^3} (1 - \omega'_s) - 2\mu'_{st} y_3 \frac{a'_s}{y_4^2} \omega'_{sx} - \mu'_{st} y_3 (1 - \frac{a'_s}{y_4}) \omega'_{sxx} - \\
 &- 2\mu_{st} y_3 \frac{1 - a_s}{y_4^3} (1 - \omega_s) - 2\mu_{st} \frac{1 - a_s}{y_4^2} \omega_{sx} + \mu_{st} y_3 (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) \omega_{sxx}, \\
 \mu_{1n} &= -\frac{y_1}{(y_2 + 1)^2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{1\varepsilon} &= \mu'_{st} \frac{a'_s}{y_4^2} (1 - \omega'_s) - \mu'_{st} y_3 \frac{a'_s}{y_4^2} \omega'_{s\varepsilon} - \mu'_{st} (1 - \frac{a'_s}{y_4}) \omega'_{sx} - \mu'_{st} y_3 \left(1 - \frac{a'_s}{y_4} \right) \omega'_{sx\varepsilon} + \\
&+ \mu_{st} \frac{1 - a_s}{y_4^2} (1 - \omega_s) - \mu_{st} y_3 \left(1 - \frac{1 - a_s}{y_4} \right) \omega_{sx} - \\
&- \mu_{st} y_3 (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) \omega_{sx\varepsilon} - \mu_{st} y_3 \frac{1 - a_s}{y_4^2} \omega_{s\varepsilon}, \\
\mu_{2x} &= \mu'_{st} \frac{a'_s}{y_4^2} (1 - \omega'_s - y_3 \omega'_{s\varepsilon}) - \mu'_{st} (1 - \frac{a'_s}{y_4}) (\omega'_{sx} + y_3 \omega'_{sx\varepsilon}) + \\
&+ \mu_{st} \frac{1 - a_s}{y_4^2} (1 - \omega_s - y_3 \omega_{s\varepsilon}) - \mu_{st} (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) (\omega_{sx} + y_3 \omega_{sx\varepsilon}), \\
\mu_{2\varepsilon} &= -\mu'_{st} (1 - \frac{a'_s}{y_4}) (2\omega'_{s\varepsilon} + y_3 \omega'_{s\varepsilon\varepsilon}) - \mu_{st} (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) (2\omega_{s\varepsilon} + y_3 \omega_{s\varepsilon\varepsilon}), \\
\mu_{20} &= \mu_{2n} = 0, \\
\mu_{1t} &= \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \left(\frac{y_1}{y_2 + 1} - \mu_1 \right); \quad \mu_{2t} = -\frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \mu_2 \quad \mu_{3t} = \left(\frac{R''_{bt}}{R_{bt}} - \frac{R'^2_{bt}}{R_{bt}^2} \right) \frac{y_1 y_4}{y_2 + 1}, \\
\mu_{4t} &= \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} y_1 \left(\frac{2y_4}{y_2 + 2} - \frac{2y_4 - 0,5}{y_2 + 1} \right) - \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \mu_4, \\
\mu_{5t} &= -\frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \mu_5; \quad \mu_{6t} = \left(\frac{R''_{bt}}{R_{bt}} - \frac{R'^2_{bt}}{R_{bt}^2} \right) y_1 \left(\frac{y_4^2}{y_2 + 2} - \frac{y_4^2 - 0,5y_4}{y_2 + 1} \right), \\
\mu_{3x} &= \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \frac{y_1}{y_2 + 1}, \quad \mu_{3\varepsilon} = 0; \quad \mu_{3n} = -\frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \frac{y_1 y_4}{(y_2 + 1)^2}, \quad \mu_{30} = \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \frac{y_4}{y_2 + 1}, \\
\mu_{40} &= \frac{2y_4}{y_2 + 2} - \frac{2y_4 - 0,5}{y_2 + 1}, \\
\mu_{4x} &= y_1 \left(\frac{2}{y_2 + 2} - \frac{2}{y_2 + 1} \right) - 2\mu'_{st} (0,5 - a'_s) y_3 \frac{a'_s}{y_4} (1 - \omega'_s) - \\
&- 2\mu'_{st} (0,5 - a'_s) y_3 \frac{a'_s}{y_4^2} \omega'_{sx} - \mu'_{st} (0,5 - a'_s) y_3 (1 - \frac{a'_s}{y_4}) \omega'_{sxx} + \\
&+ 2\mu_{st} (0,5 - a_s) y_3 \frac{1 - a_s}{y_4^3} (1 - \omega_s) + \\
&+ 2\mu_{st} (0,5 - a_s) y_3 \frac{1 - a_s}{y_4^2} \omega_{sx} + \mu_{st} (0,5 - a_s) y_3 (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) \omega_{sxx},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{4\varepsilon} = & \mu'_{st}(0,5 - a'_s) \frac{a'_s}{y_4^2} (1 - \omega'_s) - \mu'_{st}(0,5 - a'_s) y_3 \frac{a'_s}{y_4^2} \omega_{s\varepsilon} - \\ & - \mu'_{st}(0,5 - a'_s) (1 - \frac{a'_s}{y_4}) \omega'_{sx} - \mu'_{st}(0,5 - a'_s) y_3 (1 - \frac{a'_s}{y_4}) \omega'_{sx\varepsilon} - \\ & - \mu_{st}(0,5 - a_s) \frac{1 - a_s}{y_4^2} (1 - \omega_s) + \mu_{st}(0,5 - a_s) y_3 \frac{1 - a_s}{y_4^2} \omega_{s\varepsilon} + \\ & + \mu_{st}(0,5 - a_s) (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) \omega_{sx} + \mu_{st}(0,5 - a_s) y_3 (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) \omega_{sx\varepsilon},\end{aligned}$$

$$\mu_{4n} = y_1 \left(\frac{2y_4 - 0,5}{(y_2 + 1)^2} - \frac{2y_4}{(y_2 + 2)^2} \right), \quad \mu_{50} = \mu_{5n} = 0$$

$$\begin{aligned}\mu_{5x} = & \mu'_{st}(0,5 - a'_s) \frac{a'_s}{y_4^2} (1 - \omega'_s - y_3 \omega'_{s\varepsilon}) - \mu'_{st}(0,5 - a'_s) (1 - \frac{a'_s}{y_4}) (\omega'_{sx} + y_3 \omega'_{sx\varepsilon}) - \\ & - \mu_{st}(0,5 - a_s) \frac{1 - a_s}{y_4^2} (1 - \omega_s - y_3 \omega_{s\varepsilon}) + \mu_{st}(0,5 - a_s) (1 - \frac{1 - a_s}{y_4}) (\omega_{sx} + y_3 \omega_{sx\varepsilon}),\end{aligned}$$

$$\mu_{60} = \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \left(\frac{y_4^2}{y_2 + 2} - \frac{y_4^2 - 0,5y_4}{y_2 + 1} \right),$$

$$\mu_{6n} = \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} y_1 \left(\frac{y_4^2 - 0,5y_4}{(y_2 + 1)^2} - \frac{y_4^2}{(y_2 + 2)^2} \right),$$

$$\mu_{6x} = \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} y_1 \left(\frac{2y_4}{y_2 + 2} - \frac{2y_4 - 0,5}{y_2 + 1} \right); \quad \mu_{6\varepsilon} = 0$$

$$D_{21} = \frac{y_4}{y_2 + 1}, \quad D_{22} = \frac{y_1 y_4}{(y_2 + 1)^2},$$

$$\begin{aligned}F_2 = & 2y_5 y_6 \frac{y_4}{(y_2 + 1)^2} - \frac{y_5 y_8}{y_2 + 1} + \frac{y_1 y_8 y_6}{(y_2 + 1)^2} - \frac{2y_1 y_4 y_6^2}{(y_2 + 1)^3} - \\ & - (\mu_{1x} y_8 + \mu_{2x} y_7 + \mu_{3x}) y_8 - (\mu_{10} y_8 + \mu_{20} y_7 + \mu_{30}) y_5 - \\ & - (\mu_{1\varepsilon} y_8 + \mu_{2\varepsilon} y_7 + \mu_{3\varepsilon}) y_7 - (\mu_{1n} y_8 + \mu_{2n} y_7 + \mu_{3n}) y_6 - \\ & - \mu_{1t} y_8 - \mu_{2t} y_7 - \mu_{3t},\end{aligned}$$

$$D_{31} = \frac{y_4^2}{y_2 + 2} - \frac{y_4^2 - 0,5y_4}{y_2 + 1}, \quad D_{32} = \left(\frac{y_4^2 - 0,5y_4}{(y_2 + 1)^2} - \frac{y_4^2}{(y_2 + 2)^2} \right) y_1,$$

$$\begin{aligned}
F_3 = & \ddot{\bar{M}}_t + \frac{R'_{bt}}{R_{bt}} \dot{\bar{M}}_t + \frac{R''_{bt}}{R_{bt}} \bar{M}_t - 2 \frac{R'^2_{bt}}{R_{bt}} \bar{M}_t - y_5 y_8 \left(\frac{2y_4}{y_2 + 2} - \frac{2y_4 - 0,5}{y_2 + 1} \right) - \\
& - 2y_5 y_6 \left(\frac{y_4^2 - 0,5y_4}{(y_2 + 1)^2} - \frac{y_4^2}{(y_2 + 2)^2} \right) - y_1 y_6 y_8 \left(\frac{2y_4 - 0,5}{(y_2 + 1)^2} - \frac{2y_4}{(y_2 + 1)^2} \right) - \\
& - 2y_1 y_6^2 \left(\frac{2y_4^2}{(y_2 + 2)^3} - \frac{y_4^2 - 0,5y_4}{(y_2 + 1)^3} \right) - (\mu_{4x} y_8 + \mu_{5x} y_7 + \mu_{6x}) y_8 - \\
& - (\mu_{40} y_8 + \mu_{50} y_7 + \mu_{60}) y_5 - (\mu_{4\varepsilon} y_8 + \mu_{5\varepsilon} y_7 + \mu_{6\varepsilon}) y_7 - \mu_{4t} y_8 - \mu_{5t} y_7 - \mu_{6t} \\
& \begin{cases} D_{11} = A_1(t) [S_1(y_1 + y_1 S'_1(y_1))] \\ F_1 = \gamma_1 y_7 - \ddot{\varepsilon}_{yt} - \gamma_1 \dot{\varepsilon}_{yt} - A_1(t) [2S'_1(y_1) + y_1 S''_1(y_1)] y_5^2 - \\ - A_2(t) [S_1(y_1) S'_1(y_1)] y_5 - A_3(t) [S_2(y_1) + y_1 S'_2(y_1)] y_5 - \\ - A_4(t) y_1 S_1(y_1) - A_5(t) y_1 S_2(y_1) \end{cases} \\
D_{41} = & f_* m_* y_1^{m_*-1}, \quad F_4 = -f_* m_* (m_* - 1) y_1^{m_*-2} y_5^2, \quad (23)
\end{aligned}$$

Таким образом решение задачи сведено к решению задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (22) с переменными коэффициентами. Аналитическое решение этой существенно нелинейной системы не представляется возможным. Поэтому она решается численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка [9].

Для решения задачи Коши необходимо располагать начальными условиями. Первые четыре значения начального вектора определяются из следующей нелинейной системы алгебраических уравнений, которая получается из (7), (14) и (18) при $t=t_0$.

$$\begin{cases} y_{10} S_1(y_{10}) \frac{R_{b0}}{E_{b0}} = y_{30} - \varepsilon_{yt_0}, \\ y_{10} \frac{y_{40}}{y_{20} + 1} + \mu'_{s0} \frac{y_{30}}{y_{40}} (y_{40} - a'_s)(1 - \omega'_{s0}) + \\ + \mu_{s0} \frac{y_{30}}{y_{40}} (y_{40} - 1 + a_s)(1 - \omega_{s0}) = 0, \\ y_{10} \left(\frac{y_{40}^2}{y_{20} + 2} - \frac{y_{40}^2}{y_{20} + 1} \right) + \mu'_{s0} (0,5 - a'_s) \frac{y_{30}}{y_{40}} (y_{40} - a'_s)(1 - \omega'_{s0}) - \\ - \mu_{s0} (0,5 - a_s) \frac{y_{30}}{y_{40}} (y_{40} - 1 + a_s)(1 - \omega_{s0}) = \bar{M}_0 \\ y_{20} = 1 - f_* y_{10}^{m_*} \end{cases} \quad (24)$$

Для решения нелинейной системы алгебраических уравнений используется следующая численная методика. Так как заранее

известны пределы изменения уровня сжимающих напряжений в крайнем сжатом волокне бетона $y_{10} \in [0; 1]$, задаемся его значением. Тогда из первого и четвертого уравнений соответственно получим y_{30} и y_{20} . При этом второе уравнение системы (24) превращается в уравнение с одним неизвестным y_{40} . Оно решается известным методом [9]. Затем при найденных значениях неизвестных проверяется третье уравнение. По описанной схеме y_{10} и другие неизвестные могут быть определены с любой наперед заданной точностью. Описанный алгоритм легко программируется и на алгоритмическом языке Турбо-Паскаль составлена соответствующая процедура с входными и выходными параметрами.

Остающиеся четыре элемента начального вектора определяются как решение следующей линейной системы, которая получается из (7), (16) и (19) при $t=t_0$.

$$\begin{cases} d_1 y_{50} - y_{70} = -c_1 \\ d_2 y_{50} - d_3 y_{60} + d_4 y_{70} + d_5 y_{80} = c_2 \\ d_6 y_{50} + d_7 y_{60} + d_8 y_{70} + d_9 y_{80} = c_3 \\ d_{10} y_{50} + y_{60} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

Входящие в эту систему коэффициенты определяются по результатам первой половины начального вектора, т.е. по результатам предыдущей системы уравнений (24):

$$\begin{aligned} d_1 &= A_1(t_0)[S_1(y_{10}) + (y_{10})S'_1(y_{10})], \\ c_1 &= A_6(t_0)y_{10}S_1(y_{10}) + A_7(t_0)y_{10}S_2(y_{10}) + \dot{\varepsilon}_{y_{t_0}}, \\ d_2 &= \frac{y_{40}}{y_{20} + 1}; d_3 = \frac{y_{10}y_{40}}{(y_{20} + 1)^2}, \\ d_4 &= \mu'_{st_0} \left(1 - \frac{a'_s}{y_{40}} \right) (1 - \omega'_{s0} - y_{30}\omega'_{s\varepsilon 0}) + \mu_{st_0} \left(1 - \frac{1 - a_s}{y_{40}} \right) (1 - \omega_{s0} - y_{30}\omega_{s\varepsilon 0}), \\ d_5 &= \frac{y_{10}}{y_{20} + 1} + \mu'_{st_0} y_{30} \frac{a'_s}{y_{40}^2} (1 - \omega'_{s0}) - \mu'_{st_0} y_{30} \left(1 - \frac{a'_s}{y_{40}} \right) \omega'_{sx0} + \\ &+ \mu_{st_0} y_{30} \frac{1 - a_s}{y_{40}^2} (1 - \omega_{s0}) - \mu_{st_0} y_{30} \left(1 - \frac{1 - a_s}{y_{40}} \right) \omega_{sx0}, \\ d_6 &= \frac{y_{40}^2}{y_{20} + 2} - \frac{y_{40}^2 - 0,5y_{40}}{y_{20} + 1}, d_7 = y_{10} \left(\frac{y_{40}^2 - 0,5y_{40}}{(y_{20} + 1)^2} - \frac{y_{40}^2}{(y_{20} + 2)^2} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d_8 &= \mu'_{st_0} (0,5 - a'_s) \left(1 - \frac{a'_s}{y_{40}} \right) (1 - \omega'_{s0} - y_{30} \omega'_{s\epsilon 0}) - \\
&\quad - \mu_{st_0} (0,5 - a_s) \left(1 - \frac{1 - a_s}{y_{40}} \right) (1 - \omega_{s0} - y_{30} \omega_{s\epsilon 0}) , \\
d_9 &= y_{10} \left(\frac{2y_{40}}{y_{20} + 2} - \frac{2y_{40} - 0,5}{y_{20} + 1} \right) + \mu'_{st_0} (0,5 - a'_s) y_{30} \frac{a'_s}{y_{40}^2} (1 - \omega'_{s0}) - \\
&\quad - \mu'_{st_0} (0,5 - a'_s) y_{30} \left(1 - \frac{a'_s}{y_{40}} \right) \omega'_{sx0} - \mu_{st_0} (0,5 - a_s) y_{30} \frac{1 - a_s}{y_{40}^2} (1 - \omega_{s0}) + \\
&\quad + \mu_{st_0} (0,5 - a_s) y_{30} \left(1 - \frac{1 - a_s}{y_{40}} \right) \omega_{sx0} , \\
c_3 &= \dot{\bar{M}}_{t_0} + \frac{R'_{bt_0}}{R_{bt_0}} \bar{M}_{t_0} - y_{10} \left(\frac{y_{40}^2}{y_{20} + 2} - \frac{y_{40}^2 - 0,5y_{40}}{y_{20} + 1} \right) \frac{R'_{bt_0}}{R_{bt_0}} , \\
d_{10} &= f_* m_* y_{10}^{m_* - 1} ; c_2 = - \frac{R'_{bt_0}}{R_{bt_0}} y_{10} \frac{y_{40}}{y_{20} + 1}
\end{aligned}$$

Разработанный алгоритм позволяет численно с любой наперед заданной точностью определить напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента, а также построить зависимость кривизны от изгибающего момента с учетом нелинейно-наследственной ползучести бетона и упругопластической работы арматуры, что немаловажно при определении перемещений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М. Стройиздат, 1982, 287с.
2. Бондаренко С.В., Санжаровский Я.С. Усиление железобетонных конструкций при реконструкции зданий. М., Стройиздат, 1990, 352с.
3. Гаджиев М.А. Расчет армированных элементов строительных конструкций с применением реальных нелинейных диаграмм кратковременного и длительного деформирования материалов. Баку, Элм, 1996, 266с.
4. Ильюшин А.А. Пластичность, М-Л, Гостехиздат, 1948, 380с.
5. Вищневекский Г.Д. Введение в техническую теорию деформаций набухания и усадки бетона Тр. Ленинград.инж.стр. ин-та, 1957, вып.26, с.144-152.

6. Прокопович И.Е., Улицкий И.И. О теориях ползучести бетона.
//Изв.вузов Строительство и архитектура, Новосибирск, 1963,
№10, с.13-34.
7. Гаджиев М.А. Дифференциальная форма записи нелинейно-
наследственного уравнения ползучести В.М.Бондаренко.
//Региональный межвузовский сборник научных трудов
«Системные технологии, вып.4(39), Днепропетровск, 2005, С.13-20.
8. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных
конструкций на изменение температуры и влажности с учетом
ползучести. М. Стройиздат, 1973, 432с.
9. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики.
М., Наука, 1970, 664с.

Получено 14.03.2006 г.