

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ БЕСШАХТНЫМ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Разработана автоматизированная система контроля и управления тепловым режимом воздухонагревателя Калугина на основе концепции программно-возмущенного движения. Система состоит из экспертной подсистемы управления программным движением объекта, подсистемы регулирования с условным и безусловным прогнозированием и подсистемы перекидки клапанов. Результаты пересчетного моделирования системы с использованием натурных данных показали возможность улучшения эффективности управления по сравнению с действующей системой.

Воздухонагреватель, экспертные системы, нейронные сети.

We have developed monitoring and control automated system of Kalugin's air-stove heating rate on basis of programmed disturbed motion conception. System consists of object programmed motion control expert subsystem, regulation subsystem with conditional and unconditional prediction and valve reversing subsystem. System modeling results with using full-size data show possibility of control effectiveness improvement in comparison with active system.

Stove, expert systems, neural networks.

Постановка задачи синтеза системы контроля и управления тепловым режимом воздухонагревателя Калугина

Воздухонагреватели – мощные металлургические агрегаты, во многом определяющие экономику доменного производства. Повышение температуры нагреваемого в них дутья приводит к сокращению расхода кокса и росту производительности доменных печей, что существенно снижает эксплуатационные расходы.

В качестве объекта управления рассмотрим новый бесшахтный воздухонагреватель (ВН) конструкции Калугина, характерной особенностью которого является организация струйно-вихревого перемешивания газа и воздуха, что позволяет более эффективно использовать топливо (коксодоменный газ), по сравнению с традиционными воздухонагревателями с внутренней камерой горения, и обеспечивает равномерность его сжигания. Полное отсутствие пульсирующего горения дает возможность форсировать режимы работы воздухонагревателей («нагрев», «дутье», «отделение») без появления сильных колебаний давления и вибраций, избежать повреждения кладки и конструкций.

В действующей системе автоматического управления режим «нагрев» характеризуется поддержанием рационального соотношения «газ / воздух» при максимально возможном расходе газа. Поскольку бесшахтные воздухонагреватели имеют малогабаритную систему сжигания газа без протяженной камеры горения, то весьма важным является вопрос качества сжигания газа при больших его расходах, в частности – снижения содержания СО в дымовых

газах. Замеры содержания СО в дымовых газах $M_{CO}(t)$ для воздухонагревателя Калугина и шахтного воздухонагревателя в условиях ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (рис. 1) свидетельствуют о том, что воздухонагреватель Калугина не всегда эффективнее традиционных воздухонагревателей. Причиной такого положения является неэффективное автоматическое регулирование процесса горения топлива в режиме «нагрев».

В результате анализа проблемной ситуации сформирована *задача построения интеллектуальной автоматизированной системы контроля и управления тепловым режимом ВН*, решение которой улучшит его экологичность.

Исходные данные и условия задачи.

1. Концепция управления технологическим объектом на основе разделения его движения на две составляющие: программную и возмущенную. Концепция интеллектуального управления сложными металлургическими объектами [2] – [3].

2. Известные алгоритмы, применимые для управления ВН в режиме «нагрев»: оптимизации режима «нагрев» воздухонагревателей доменных печей путем изменения расхода воздуха на базе статической характеристики «расход воздуха – установившаяся температура купола», полученной при максимально возможном расходе топлива [1]; управления воздухонагревателем с помощью дифференциальных уравнений, составленных с использованием закономерности протекающих в нем физических процессов [4].



Рис. 1. Замеры содержания CO в дымовых газах

3. Структура модели воздухонагревателя в режиме «нагрев»:

$$Y_M(t) = \Phi_1(U_{1П}(t), U_{2П}(t), W_K^B(t)) + \Phi_2(\delta U_1(t - T_n^{ov}), \delta U_2(t - T_n^{ov}), \delta W_K(t - T_n^{ov})) + \delta Y(t); \quad (1)$$

$$U_1(t) = U_{1П}(t) + \delta U_1(t); \quad U_2(t) = U_{2П}(t) + \delta U_2(t);$$

$$W_K(t) = W_K^B(t) + \delta W_K(t),$$

где $\Phi_1(\cdot)$ — производственная модель соответствия программных управляющих воздействий $U_{1П}(t)$, $U_{2П}(t)$ и базовых уровней контролируемых внешних воздействий $W_K^B(t)$ программной составляющей выходного воздействия, накапливаемых и модифицируемых в базе знаний (БЗ); $\Phi_2(\cdot)$ — нейросетевая модель влияния отклонений от программных и базовых уровней входных воздействий на изменение выходного воздействия; $Y_M(t)$ — выходное воздействие модели объекта управления; $U_1(t)$, $U_2(t)$ — управляющие воздействия; $\delta U_1(t)$, $\delta U_2(t)$ — регулирующие воздействия; $\delta Y(t)$ — эффект неконтролируемых внешних воздействий; $W_K(t)$ — контролируемое внешнее воздействие; $\delta W_K(t)$ — отклонение от $W_K^B(t)$; T_n^{ov} — интервал памяти объекта управления.

4. Натурные данные эксплуатации действующей системы управления воздухонагревателем Калугина, включающие: температуру подкупольного пространства — $Y(t) = T_{КП}(t)$, расход газа — $U_1(t) = Q_T(t)$, расход воздуха — $U_2(t) = Q_B(t)$, калорийность газа — $W_K(t)$, химический состав газа [CO_2 , непредельные углеводороды, CO , CH_4 , H_2 , N_2], концентрацию CO в отходящем дыме — $M_{CO}(t)$, температуру дыма — $T_D(t)$, температуру насадки переходной зоны динасамот — $T_H(t)$. Динамические характеристики воздухонагревателя по каналам регулирования в зоне горения для различных рабочих уровней расхода газа.

5. Структура действующей автоматизированной системы управления (АСУ) тепловым режимом воз-

духонагревателя Калугина в ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», в частности, подсистема регулирования соотношения «газ / воздух» $\alpha(t)$ с поддержанием заданной температуры купола; подсистема перевода воздухонагревателя с «дутья» на «нагрев» и обратно, через режим «отделение» и соответствующие им признаки перекидки клапанов; технологическая инструкция по эксплуатации АСУ воздухонагревателем для газовщика доменной печи.

6. Аппарат искусственных нейронных сетей: многослойный персептрон, алгоритм обратного распространения ошибки, алгоритм Левенберга-Марквардта, алгоритм сопряженных градиентов, алгоритм быстрого распространения, радиальная нейронная сеть, алгоритм Линде-Бузо-Грея, самоорганизующаяся сеть Кохонена.

7. Практический опыт специалистов-экспертов (опытных газовщиков), квалифицированно решающих задачу управления нагревом дутья.

8. Методика построения производственной модели представления знаний типа: IF (условие), THEN (действие). Программный продукт разработки специализированных экспертных систем, поддерживающих работу в сети Internet — Exsys CORVID.

9. Интегральный критерий оптимальности управления:

$$Q(t) = \gamma_1 Q_1^H(t) + \gamma_2 Q_2^H(t) + \gamma_3 Q_3^H(t);$$

$$Q_j^H(t) = \frac{Q_j(t) - Q_j^{\min}}{Q_j^{\max} - Q_j^{\min}};$$

$$Q_1(t) = \int_{t_n}^{t_k} |E_p(t)| dt; \quad Q_2(t) = \int_{t_n}^{t_k} U_1(t) dt;$$

$$Q_3(t) = \int_{t_n}^{t_k} M_{CO}(t) dt,$$

где $Q_1^H(t)$, $Q_2^H(t)$, $Q_3^H(t)$ — нормированные значения $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_3(t)$; $j = 1, 2, 3$; $Q_1(t)$ — интегральная оценка качества переходного процесса за время нагрева $(t_k - t_n)$; $E_p(t)$ — ошибка реализации программного движения; $Q_2(t)$ — интегральный расход топлива; $Q_3(t)$ — количество угарного газа, выбра-

сываемого в атмосферу за период нагрева; $M_{CO}(t)$ – концентрация угарного газа в дыме; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – весовые коэффициенты; $\sum_{i=1}^3 \gamma_i = 1$.

10. Ограничения на параметры управления и состояния в режиме «нагрев»:

$$0 \leq U_1(t) \leq 10^5 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad 900 < Y(t) < 1450 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$0 \leq M_{CO}(t) \leq 1\%, \quad 100 < T_d(t) \leq 400 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$540 < T_H(t) \leq 1100 \text{ }^\circ\text{C}, \quad 0,6 \leq \alpha(t) \leq 1,6,$$

где $\alpha(t) = U_1(t) / U_2(t)$ – коэффициент соотношения «газ / воздух».

Требуется на базе названных аналогов и прототипов, включая действующую АСУ, разработать новую систему управления тепловым режимом ВН, минимизирующую интегральный критерий $Q(t)$, удовлетворяющую ограничениям и учитывающую опыт газовщиков по выбору программного движения объекта управления.

Сформулированная инженерная задача может быть решена на основе концепции программного и возмущенного движения, выбора и конкретизации одной из типопредставительных современных интеллектуальных систем управления [2], а также опыта функционирования действующей системы управления воздушонагревателем Калугина.

Предлагаемая автоматизированная система контроля и управления тепловым режимом воздушонагревателя

Созданная эвристическим путем структура интеллектуальной системы управления тепловым режимом воздушонагревателя Калугина опирается на концепцию программного и возмущенного движения и объединяет два современных интеллектуальных инструмента – искусственные нейронные сети и динамические экспертные системы.

Функциональная структура предлагаемой системы контроля и управления тепловым режимом воздушонагревателя (рис. 2) состоит из следующих основных частей.

1. Подсистема перекидки клапанов, представленная распознавателем моментов осуществления перекидки клапанов при переключении режимов работы воздушонагревателя, блоком выбора программы перекидки и блоком реализации выбранной программы. Подсистема предназначена для перевода воздушонагревателя с режима «дутье» на режим «нагрев» и обратно через промежуточный режим «отделение». Переходные режимы (перевод воздушонагревателя с «отделения» на «нагрев», с «нагрева» на «отделение», с «отделения» на «дутье», с «дутья» на «отделение») осуществляются по соответствующей циклограмме. Каждая циклограмма представлена жесткой последовательностью переключения (перекидки) клапанов ВН, сформированной на основе ретроспективного анализа и оптимизации циклограммы, применяемой в действующей АСУ.

Распознаватель моментов перекидки выполняет следующие основные функции:

- оценивание информативных признаков для выбора типа перекидки клапанов;

- отнесение текущей ситуации к одному из типов переходного режима на основе анализа значений этих признаков.

2. Подсистема регулирования теплового режима, состоящая из нейросетевого регулятора температуры, регулятора соотношения «газ / воздух» и анализатора отклонений от программы. *Нейродинамический регулятор* температуры состоит из поискового и беспоискового блоков [2]. В поисковой части регулятора оптимальные управляющие воздействия определяются с использованием имитационной модели объекта управления (1), с помощью которой осуществляется прогнозирование его выходных воздействий и состояний в ускоренном режиме времени, при переборе возможных вариантов регулирующих воздействий с учетом ограничений.

Специфика поисковой части регулятора определяется оптимизацией управления на скользком промежутке $(t_n, t_n + T_0)$, где T_0 – интервал оптимизации, n – номер такта работы системы; экстраполяцией контролируемых возмущений и косвенных оценок эффектов неконтролируемых возмущений, приведенных к выходу объекта, определяемых с помощью модели (1), работающей в реальном времени. В качестве $\Phi_2(\cdot)$ предлагается использовать многослойный персептрон с униполярной функцией активации сигмоидального типа. Формирование множества возможных вариантов регулирующих воздействий осуществляется с помощью различных алгоритмов обучения в беспоисковой части регулятора температуры.

Регулятор соотношения «газ / воздух» работает в соответствии со следующим аналитическим выражением:

$$\delta U_2(t) = \frac{U_{1п}(t) + \delta U_1(t)}{\alpha^*(t)} - U_{2п}(t),$$

где $\alpha^*(t)$ – заданный коэффициент соотношения «газ / воздух».

Анализатор отклонений от программы оценивает возможность выполнения регулятором программы управления, поскольку при чрезмерно больших отклонениях от заданной траектории движения необходима корректировка самой программы. В результате в блоке «Программатор» осуществляется корректировка программы управления, соответствующая сложившейся ситуации.

3. Подсистема управления программным движением, состоящая из программатора, БЗ «Программы управления», редактора БЗ, блока реализации программного движения. БЗ содержит упорядоченное множество типовых программных траекторий на режим нагрева $\langle Y_{п}(t), U_{1п}(t), U_{2п}(t) \rangle$ и условий, когда целесообразно их использовать. Типовое производное правило в БЗ выглядит следующим образом: «Если [«Ситуация в системе» = «№ 1»], то [«Программа

управления $\langle Y_{\text{п}}(t), U_{\text{п}}(t), U_{2\text{п}}(t) \rangle = \langle \text{№ 1} \rangle$. Программатор просматривает существующие данные из рабочей памяти (базы данных), распознает ситуацию на момент включения режима «нагрев» и выбирает соответствующее правило из базы знаний, а затем отправляет конкретную программу в блок реализации программного движения. Если программатор не смог однозначно распознать ситуацию, то он выбирает не одно правило, а несколько правил, которые

составляют так называемое конфликтное множество. Для разрешения конфликта он имеет дополнительный критерий (интегральный расход газа), с помощью которого он выбирает единственное правило, после чего оно срабатывает. Если с помощью этого критерия программатор не смог разрешить конфликт, то он выбирает ту программу управления (то правило), которую наиболее часто использовал управленческий персонал.

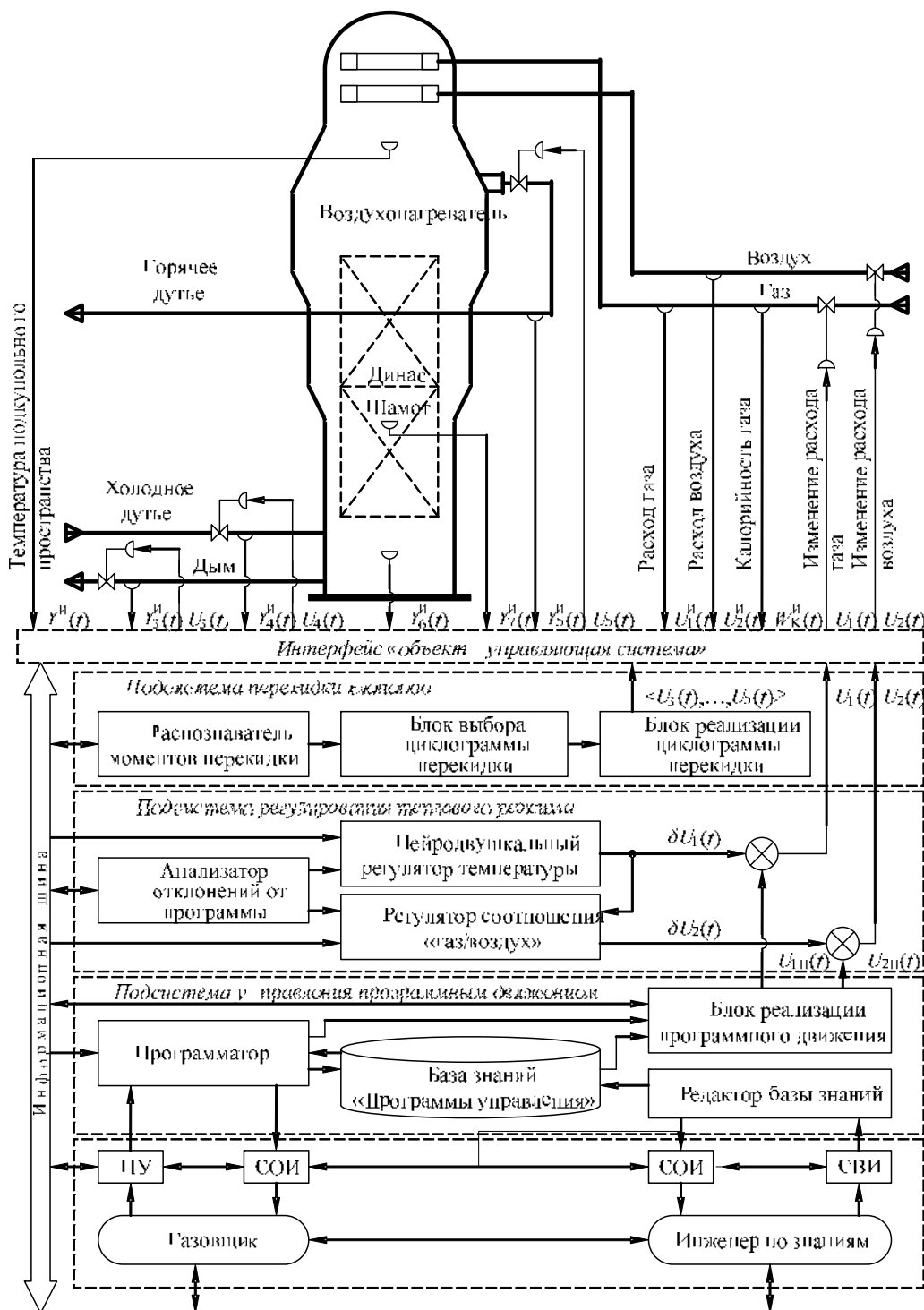


Рис. 2. Структура автоматизированной системы контроля и управления тепловым режимом воздухоподогревателя конструкции Калугина

Инженер по знаниям наполняет БЗ через систему ввода информации (СВИ) и редактор БЗ путем извлечения, структурирования и формализации знаний опытного газовщика-эксперта, с привлечением дополнительных источников знаний (натурных данных, отражающих действия управленческого персонала, технологических инструкций).

Формализация знаний осуществляется в явном виде с помощью продукционного способа путем решения задачи оптимизации траектории движения системы следующим образом:

а) распознается ситуация на объекте по информативным признакам (например, «вид топлива» = «природный газ» или «доменный газ», или «смешанный газ (в определенный момент времени часть доменного газа заменяют природным)» и его калорийность, «схема включения ВН» = «последовательная» или «попарно-параллельная» или «смешанная», а также параметры дымовых газов, холодного дутья, кожуха, насадок, горячего дутья ВН) в соответствие которой ставится множество ретроспективно фиксированных рациональных структурно близких траекторий, обеспечивающих соблюдение технологических, экономических и экологических требований, контролируемых переменных $\langle \tilde{Y}(t), \tilde{U}_1(t), \tilde{U}_2(t) \rangle$;

б) из полученного множества реализаций процесса нагрева $\langle \tilde{Y}(t), \tilde{U}_1(t), \tilde{U}_2(t) \rangle$ выбирается одна типопредставительная (индекс «Т») реализация $\langle Y^T(t), U_1^T(t), U_2^T(t) \rangle$, соответствующая максимальной близости к многомерной расчетной медиане, что обеспечивает ослабление влияния неконтролируемых возмущений в натурной типопредставительной реализации;

в) в отобранной реализации $\langle Y^T(t), U_1^T(t), U_2^T(t) \rangle$ выделяется низкочастотная составляющая. Полученный результат рассматривается в качестве программного движения системы $\langle Y_{\Pi}(t), U_{\Pi}(t) \rangle$,

$U_{2\Pi}(t) >$, рационального в условиях рассматриваемой ситуации, если он удовлетворяет эксперта.

Газовщик, наблюдая через систему отображения информации (СОИ) за ходом процесса (в частности, за динамикой работы клапанов, за основными технологическими переменными, за наличием факела в камере горения), может в ручном режиме через пульт управления (ПУ) вмешиваться в работу агрегата (например, дистанционно управлять температурой подкупольного пространства, изменяя расход газа и расход воздуха, переключать каждый клапан, выбирать режим работы и схему включения ВН), а также влиять на процесс формирования программы управления, корректируя выбранную типопредставительную реализацию. При нормальном состоянии четырех воздухонагревателей доменной печи предусматривается попарно-параллельная схема включения аппаратов с полным циклом в течение 6 ч. При необходимости цикл может быть сокращен до 4 ч.

Для сравнительного анализа предлагаемого нейродвухкального регулятора с типовыми регуляторами (регулятор Смита, регулятор Ресвика, ПИ-регулятор) выполнено пересчетное моделирование с выделением характерных типопредставительных ситуаций, возникающих по ходу технологического процесса. Моделирование (рис. 3) показало, что предлагаемый регулятор эффективнее типовых в среднем на $10 \div 20 \%$ (по критерию $R_N(t) = ((\sigma_0(t) - \sigma_N(t)) / \sigma_0(t)) 100\%$, где $\sigma_0(t)$, $\sigma_N(t)$ – среднеквадратическая ошибка реализации программного движения при отсутствии регулирования и при использовании N -го варианта регулятора) за счет использования в нем имитационной нелинейной ситуационно поднастраиваемой модели объекта, ускоренного поиска оптимального варианта управления, учитывающего прогноз контролируемых внешних воздействий и введенного возмущения.

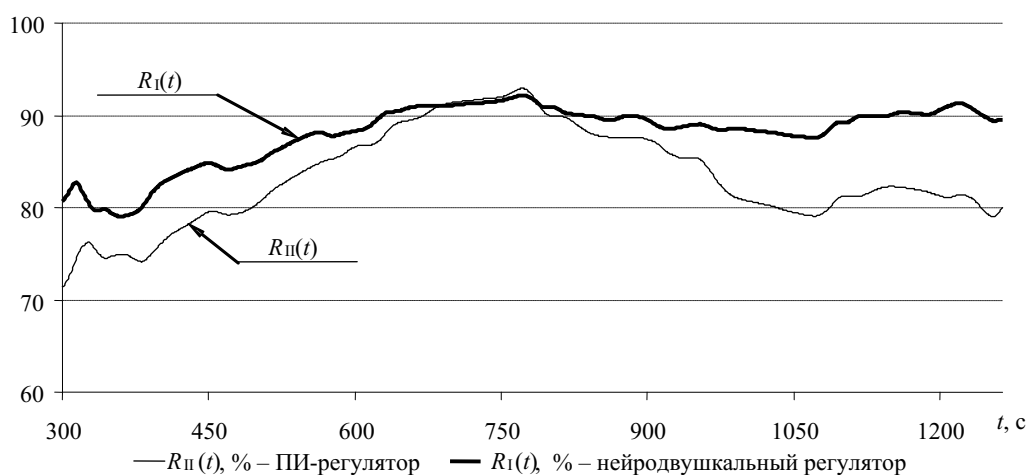


Рис. 3. Диаграммы пересчетного моделирования

Результаты ситуационного пересчетного моделирования предложенной системы контроля и управления с использованием натурных данных, полученных в доменном цехе ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», показали возможность улучшения эффективности управления в 1,5 ÷ 2,0 раза (по интегральному критерию оптимальности) по сравнению с действующей системой.

Литература

1. Андреев, С.М. Оптимизация режима нагрева воздушонагревателей доменных печей / С.М. Андреев, Б.Н. Пар-

сункин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 7. – С. 33 – 37.

2. Кулаков, С.М. Интеллектуальные системы управления технологическими объектами: теория и практика / С.М. Кулаков, В.Б. Трофимов. – Новокузнецк, 2009.

3. Спирин, Н.А. Информационные системы в металлургии: Учебник для вузов / [Н.А. Спирин и др.]. – Екатеринбург, 2001.

4. Muske, K.R. Blast furnace stove control / [K.R. Muske and others] // American control conference. – Philadelphia: Villanova University, 1998. – С. 24 – 25.

УДК 62

А.Н. Щегряев

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор В.В. Захаров

ОБ ОЦЕНКЕ ВРЕМЕННОЙ СОСТОЯТЕЛЬНОСТИ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАНСПОРТА НА БОЛЬШОЙ СЕТИ

В статье рассматриваются различные подходы к оценке эффективности эвристических алгоритмов и приводится новый критерий, названный экспериментальным уровнем временной состоятельности алгоритма.

Временная состоятельность, задача маршрутизации транспорта, эвристические алгоритмы.

Different approaches to assessment of efficiency of heuristic algorithms are considered in the paper. A new criterion called an experimental level of time consistency is presented.

Time consistency, vehicle routing problem, heuristic algorithm.

Введение

Для выживания в условиях свободного рынка компании стремятся использовать весь арсенал доступных инструментов, позволяющих получить конкурентное преимущество перед другими компаниями. Одним из таких инструментов является оптимизация накладных затрат, которая позволяет при том же объеме используемых ресурсов увеличить прибыль. Для транспортных компаний существенная оптимизация затрат может быть достигнута в том числе и за счет построения эффективных маршрутов для транспортных средств. Именно по этой причине эффективным алгоритмам решения задачи маршрутизации транспорта (ЗМТ, VRP – vehicle routing problem) уделено столь пристальное внимание со стороны исследователей. Под задачами транспортной маршрутизации понимают широкий класс известных комбинаторных задач оптимизации. Основной целью в данных задачах является построение набора маршрутов для транспортных средств (ТС), которые обслуживают множество географически распределенных потребителей с заданным спросом. ЗМТ является обобщением широко известной задачи коммивояжера, и поэтому, так же как и задача коммивояжера, относится к классу NP-трудных задач. Таким образом, применение точных алгоритмов для решения задач большой размерности в разумное

время затруднено [6]. Вместо них используют различные эвристические и метаэвристические алгоритмы, способные быстро находить хорошие решения без гарантии оптимальности и, как правило, без оценки погрешности.

Для сравнения эффективности эвристических алгоритмов для определенного класса задач используются опубликованные и находящиеся в открытом доступе тестовые примеры (<http://www.hec.ca/chairedistributique/data>), на которых проверяется работа алгоритма. После этого результаты, полученные при решении тестовых задач определенным алгоритмом, сравниваются с лучшими найденными решениями и оцениваются по нескольким критериям. Алгоритмы постоянно совершенствуются и, таким образом, список лучших известных решений все время обновляется. В данной работе предлагается новый подход к определению эффективности эвристических алгоритмов, основанный на оценке их временной состоятельности.

В части 1 будет произведена краткая постановка рассматриваемой задачи маршрутизации транспорта. После этого в части 2 будет приведено описание уже существующих подходов к оценке эффективности эвристических алгоритмов и предложен новый подход. В части 3 новый подход будет проиллюстрирован на примере алгоритма простого локального по-