

УДК 330.4

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ГРУЗОВЫХ СИСТЕМ

© 2009 А.М. Ольшанский*

Ключевые слова: логистическая система, грузовой фронт, математическая модель, экономический эффект, нейронная сеть, оптимизация расходов.

Рассматривается процесс управления работой различных грузовых систем с точки зрения оптимального управления и возможности постановки различных критериев оптимальности управления, в том числе экономических.

Выход на оптимальные режимы функционирования - одна из основных задач, решаемых грузовыми системами различных уровней: от одного терминала (станции, грузового района, грузового фронта) до линии, дороги, транспортной сети в целом. Поэтому в данной статье будут рассматриваться общие принципы моделирования системы управления грузовой системой¹. Для создания оптимальных условий работы каждой грузовой системы необходимо разработать методологию управления ею. Данная методология может быть создана на основе изучения поведения логико-динамической системы, которая представляет собой синтез динамической системы и интеллектуального регулятора, который может быть разработан на основе искусственной нейронной сети.

Работа грузового фронта может быть смоделирована при помощи теории управления запасами, а также теории оптимального управления динамической системой². Экономические показатели работы грузового фронта целесообразно задать общей величиной затрат; величина переменных зависит от размера той порции, которую обслуживает данный грузовой фронт.

Следовательно, общее выражение затрат можно записать как

$$C(q) = \frac{C_{const}}{q} + f(q) \cdot q, \quad (1)$$

где $C(q)$ - общие затраты на обслуживание материального потока; C_{const} - постоянные затраты для конкретного грузового фронта в денежных единицах; q - размер партии, с которой работает грузовой фронт; $f(q)$ - функция, описыва-

ющая вид зависимости переменных затрат от размера партии материального потока.

Оптимальный размер партии, рекомендованный для данного грузового фронта, может быть вычислен, исходя из условия минимизации общих затрат:

$$\frac{dC}{dq} = 0. \quad (2)$$

Грузопоток на входе в буфер (или непосредственно в грузовой фронт) может быть выражен в виде дифференциального уравнения вида

$$\frac{dQ(t)}{dt} = A(t)Q(t) + B(t)G(t) + \xi(t). \quad (3)$$

Здесь $Q(t)$ - материальный поток через грузовой фронт; $\xi(t)$ - случайный процесс, характеризующийся своим математическим ожиданием, набором моментов; $A(t)$ - коэффициент (в общем случае - матрица), учитывающий динамику работы грузовой системы во времени; $B(t)$ - коэффициент (или матрица), учитывающая изменение во времени входящих воздействий $G(t)$.

Одним из критериев соответствия работы грузовой системы заданным параметрам является нахождение значения стоимости работы C в некотором заданном интервале, тогда критерий управления грузовой системой можно задать в виде

$$F = (C(t) - C_{fix})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где F - критерий качества управления; C_{fix} - задаваемое (желаемое) значение стоимости работы.

Обобщенное уравнение развития грузового фронта как динамической системы можно задать как

* Ольшанский Алексей Михайлович, аспирант Самарского государственного университета путей сообщения.

$$\frac{dQ(t)}{dt} = A(t)Q(t) + B(t)G(t) + \xi(t) + u(Q(t), F). \quad (5)$$

В формуле (5) последний член означает управляющее воздействие на грузовой фронт, зависящее от состояния системы и соответствия целевому критерию (4).

В общем случае работа каждого грузового фронта может быть описана неоднородным линейным дифференциальным уравнением. Полученное решение будет сравниваться с двумя параметрами: со значением целевого критерия (4) и с рассчитанным оптимальным значением материального потока $Q(t)$.

Нейронная сеть, проведя анализ работы системы, должна вынести одно из решений по управлению системой.

Под управлением в данной системе может пониматься и одноплановое формальное математическое выражение, которое необходимо трансформировать в содержательные действия по нормализации работы грузовой системы, и одну из реализаций определенного набора действий. В этом случае для контроля за работой грузовой системы необходимо использовать нейронную сеть, которая должна выполнять задачу распознавания образов (см. рисунок).

Показатели качества работы грузовой системы можно ввести следующим образом: x_1 - время задержки в работе грузовой системы,

x_2 - объем задержанной порции грузопотока, т; x_3 - свободный резерв перерабатывающей способности грузовой системы, %; x_4 - мгновенные незапланированные затраты, руб.; x_5 - оперативный коэффициент неравномерности, %; x_6 - скорость обработки грузопотока, т/ед. вр.; x_7 - процент потерь и искажений, %.

Указанные выше параметры группируются по нейронам следующим образом:

- ◆ первый слой, первый нейрон: $(x_1 \ x_2 \ x_6)$;
- ◆ первый слой, второй нейрон: $(x_3 \ x_5 \ x_7)$;
- ◆ первый слой, третий нейрон: $(x_4 \ \Delta F)$;
- ◆ второй слой, нейрон: выходы из нейронов первого слоя.

Вторым целевым критерием, подтверждающим действие (4), можно определить соответствие режима работы фронта своему оптимальному режиму работы, рассчитанному исходя из оптимизации системы "фронт - буфер"³.

Каждый из сценариев управления представляет собой решение задачи управления с обратной связью, адаптированной к системе управления запасами.

Ю.И. Рыжиков предлагает применить к системам со случайным спросом принцип минимизации определенных функционалов. В интерпретации данной системы по отношению к грузовому фронту примем, что в работе фронта важно не допустить перерыва в проведении погрузочных работ. При этом

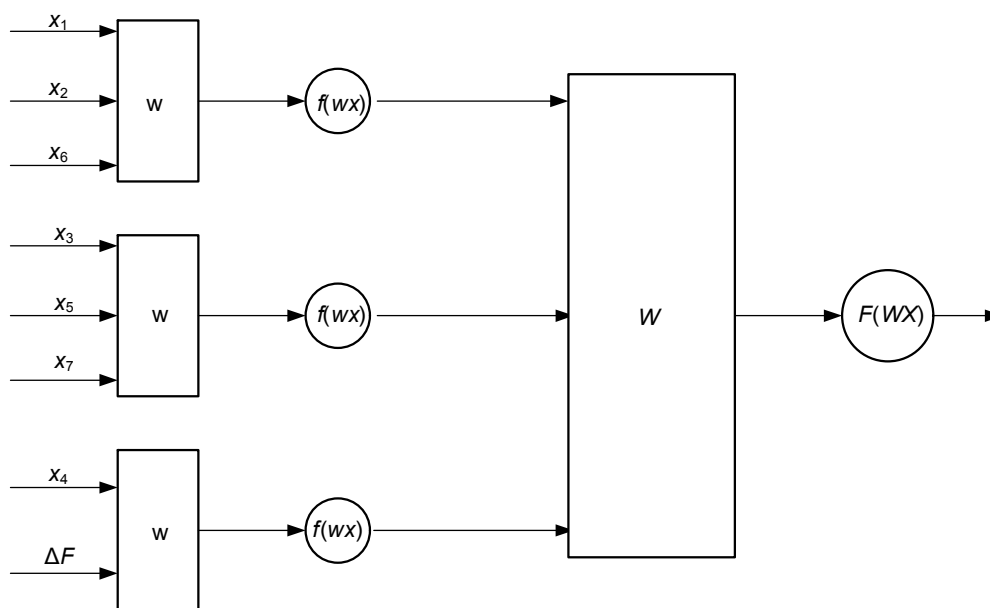


Рис. Схема нейронной сети, регулирующей работу грузовых фронтов

важно синхронизировать режим функционирования фронта с распределением интенсивности подачи подвижного состава⁴.

Пусть оптимальная производительность, или, что равносильно, загрузка конкретного грузового фронта, определяется как величина S . Расходы на хранение материального потока в единицу времени с единицы площади (объема буфера) определяются как h , а условная штрафная величина (которую можно расценить как недополученный доход от эксплуатации грузового фронта) в единицу времени с единицы площади (объема буфера) составляет d единиц. Затраты на работу по оптимизации функционирования грузового фронта составляют величину c с единицы площади (объема буфера) в единицу времени, а материальный поток через грузовой фронт составляет q .

Функционал итоговых затрат на создание и поддержание стабильного режима работы каждого грузового фронта, зависящий в морфологическом отношении от технологии работы, оборудования, свойств каждого фронта, можно выразить как

$$L = \int_0^S (S - q)f(q)dq + d \int_S^{+\infty} (q - S)f(q)dq + c(S - z), \quad (6)$$

где z - остаточный уровень материального потока в конце периода исследования.

Тогда, действуя согласно принципу (2), имеем

$$\frac{dL}{dS} = \int_0^S f(q)dq - d \int_S^{+\infty} f(q)dq + c. \quad (7)$$

Применив к выражению (7) методы, подробнее рассмотренные Ю.И. Рыжиковым⁵, получим

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dS} &= \int_0^S f(q)dq - d \int_S^{+\infty} f(q)dq + c = \\ &= hF(S) - d(1 - F(S)) + c. \end{aligned} \quad (8)$$

Приравняв (8) к нулю и выразив отсюда функцию распределения материального потока от времени как функцию распределения вероятностей, получим для грузовой системы уравнение

$$F(S) = \frac{d - c}{d + h}, \quad (9)$$

где $F(S)$ - интегральная функция распределения вероятностей за период исследования.

Грузовой фронт представляет собой логико-динамическую систему с обратной связью и с регулятором, представленным в виде нейронной сети.

Пусть изменение грузопотока (материального потока) через грузовой фронт задается уравнением вида

$$g(t) = b_n \frac{d^n Q}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} Q}{dt^{n-1}} + \dots + b_0 Q(t), \quad (10)$$

где $Q(t)$ - материальный поток через грузовой фронт; $b_n \dots b_0$ - коэффициенты при производных соответствующих порядков; $g(t)$ - вынуждающая функция, значение которой можно установить на основании внешних статистических и прогнозных данных.

Наиболее частым случаем решения является задание эволюционного уравнения в виде

$$g(t) = b_2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + b_1 \frac{dQ}{dt} + b_0 Q(t) \quad (11)$$

или

$$g(t) = b_2 \frac{d^2 Q}{dt^2} + b_0 Q(t). \quad (12)$$

Характеристические уравнения будут иметь соответственный вид:

$$0 = b_2 p^2 + b_1 p + b_0 \quad (13)$$

и

$$0 = b_2 p^2 + b_0. \quad (14)$$

Таким образом, в результате решения дифференциального уравнения строится зависимость материального потока от времени $Q(t)$ для конкретной грузовой системы (фронта). Эта информация сравнивается с рассчитанным оптимальным уровнем загрузки фронта и подается на один из входных нейронов сети. Управляющие параметры в данной задаче могут принадлежать вполне конкретному замкнутому множеству. Для решения подобных задач и вводятся функционалы качества управления.

Момент начала процесса управления задан, исходя из внешних соображений, как

t_0 , а момент окончания воздействия определяется первым моментом достижения грузовой системой $(t, Q(t))$ некоторой заданной поверхности допустимых значений Γ .

С точки зрения практики и эксплуатационной работы, можно составить множество допустимых процессов $D(t_0, Q_0, u(t))$, которое включает в себя момент окончания управления t_1 , траекторию развития грузового фронта $Q(t)$ и управление $u(\cdot)$, удовлетворяющие уравнению (2) и начальному условию задачи $Q(t_0) = Q_0$.

Для целей задач управления грузовыми системами функционалы качества управления могут быть выражены в общем виде как

$$J_0 = \int_{t_0}^T F_0(t, Q(t), u) dt, \quad (15)$$

где T - момент окончания управления, который может быть либо задан заранее, либо определяться конкретной траекторией движения; F_0 - скалярная заданная функция; u - управление.

Использование рассмотренного ранее принципа оптимальной загрузки фронта в зависимости от размера обрабатываемой порции материального потока дает право применить в качестве минимизируемого функционала величину

$$L = dq \cdot f(Q(t)) - cz \cdot f(Q(t)) - (d + h) \iint_J u(q, Q(t)) Q(t) f(q) dQ dq, \quad (16)$$

где область J - множество, содержащее в себе совокупность моментов времени, функций материального потока через фронт от времени и функций размеров порций материального потока от времени; $f(Q(t))$ - функция, корректирующая влияние материального потока.

В одномерном случае (без корректировки на материальный поток через грузовой фронт) указанное выражение будет выглядеть как

$$L = dq - cz - (d + h) \int_0^S u(q) q(t) f(q) dq. \quad (17)$$

Моделирование управляемого развития грузовых систем невозможно без выработки критериев эффективности работы и опреде-

ления понятия "эффективное управление". Как замечает А.М. Гаджинский, экономический эффект от применения логистического подхода к управлению материальными потоками в сферах производства и обращения рассматривается в разрезе следующих составляемых: снижение запасов на всем пути движения материального потока; сокращение времени прохождения товаров по логистической цепи; снижение транспортных расходов; сокращение затрат ручного труда и соответствующих расходов на операции с грузом⁶.

Эффективность работы грузовых систем можно в общем виде выразить как

$$E = \frac{R}{Z}, \quad (18)$$

где R - экономический эффект от изменения работы грузовых систем; Z - затраты, связанные с изменениями в управлении и работе грузовых фронтов.

Затраты на совершение преобразований можно в общем виде рассмотреть как

$$Z = C + nK, \quad (19)$$

где C - эксплуатационные расходы; K - капитальные вложения; n - коэффициент прироста.

Если рассмотреть систему в динамике, получим уравнение

$$\frac{dE}{dZ} = - \frac{R}{Z^2} \cdot \frac{\bar{Z}}{\bar{R}}, \quad (20)$$

где \bar{Z} , \bar{R} - соответственно, усредненные значения затрат и результата от внедрения новой системы управления грузовыми фронтами.

Однако и экономический эффект, и затраты на изменение технологии работы грузового фронта можно поставить в зависимость от времени и материального потока, проходящего через фронт:

$$E = \frac{R(t, Q)}{Z(t, Q)}. \quad (21)$$

Величину эффекта от внедрения новой системы управления грузовыми фронтами можно определить как

$$E = \frac{R(t, Q)}{Z(t, Q)} = \frac{R_{\text{лок}}(t, Q) + R_{\text{мз}}(t - t_{\text{техн}}, Q) + R_u(t - \tau, Q)}{Z(t, Q)}. \quad (22)$$

В формуле (22) $Z(t, Q)$ - это затраты на освоение материального потока $Q(t)$.

Здесь выделяются три составляющие экономического эффекта: экономический эффект локального уровня $R_{\text{лок}}(t, Q)$ - проявляется на уровне фронта (грузовой системы); экономический эффект на мезоуровне $R_{\text{мз}}(t - t_{\text{техн}}, Q)$ - проявляется по прошествии определенного времени запаздывания $t_{\text{техн}}$; экономический эффект на глобальном (относительно выбранных границ системы) уровне $R_{\text{г}}(t - \tau, Q)$ - проявляется через характерное время реакции системы τ .

Понятие эффективности можно описать как полный дифференциал функции:

(23)

Преобразования системы управления грузовыми фронтами можно рассматривать как своеобразный инвестиционный проект на железнодорожном транспорте с применением некоторых показателей оценки экономической эффективности. Денежные потоки этих проектов не являются перемещением капиталов в чистом виде, а носят некоторый условный характер. Математически такие показатели выражаются как интегральные функционалы.

Подобная методология является пилотной для железнодорожного транспорта, но также может быть с успехом применена на

сложных транспортно-логистических терминалах, а в перспективе - при организации логистических схем товародвижения в крупных и средних населенных пунктах нашей страны, так как обладает возможностями адаптации под каждый объект и встраивания в нее дополнительных блоков (системы наблюдения и измерения реакции рынка, города и т.п.). Так, при рассмотрении, к примеру, городской системы в эту методологию должен быть включен блок, учитывающий поведение населения и пространственное движение населения по территории города во времени. Следовательно, появляется необходимость обращения к такому научному направлению, как теория макросистем.

¹ Моделирование работы грузовой системы как случайно функционирующего объекта // Вестн. Самар. муницип. ин-та управления. Самара, 2007. № 5. С. 118-122.

² Пантелеев А.В., Бортаковский А.С. Теория управления в примерах и задачах: Учеб. пособие. М., 2003. 583 с.

³ Ольшанский А.М. Управление работой пространственно-распределенных грузовых систем на основе логистических принципов // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума: В 2 т. / Под ред. Н.К. Юркова. Пенза, 2007. Т. 2. С. 229-231.

⁴ Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управление запасами. СПб., 2001. 384 с.

⁵ Там же.

⁶ Гаджинский А.М. Логистика: Учеб. для высш. и средн. спец. учеб. заведений. 2-е изд. М., 1999. 228 с.