

## ПОСТРОЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

**Козлов П.А.**

(ФГУ «Ространсmodernизация» Минтранса России,  
Москва)

[Kozlov@ous.vniias.ru](mailto:Kozlov@ous.vniias.ru)

**Осокин О.В.**

(ЗАО «Аналитические и управляющие системы  
на транспорте «Транспортный алгоритм», Москва)

[OOsokin@ous.vniias.ru](mailto:OOsokin@ous.vniias.ru)

На железнодорожном транспорте создана масштабная информационная среда. Функционирует целый ряд информационных систем. Источником информации являются средства автоматизации, регистрирующие движение поездов, и десятки тысяч АРМов. Громадный объем информации, поступающий к руководителям разного уровня, существенно затрудняет её быстрый анализ и делает почти невозможным своевременное принятие эффективных управленческих решений. Поэтому необходимо создать системы автоматизированного анализа, которые бы делали его быстро и адресно, в соответствии с перечнем возможных решений того или иного руководителя.

Сложность и разнообразие методов интеллектуального анализа данных требуют создания специализированных средств конечного пользователя для решения типовых задач анализа информации в конкретных областях. Эти средства обычно входят в состав сложных многофункциональных систем поддержки принятия решений.

Интеллектуальная информационная среда должна существенно изменить процесс управления в сложной транспортной системе. Основными составляющими этого будут:

- автоматизированный мониторинг;
- наличие Интернет-технологий;

- информационные хранилища.

Несмотря на развитую информационную среду, анализ на железнодорожном транспорте пока осуществляется, в основном, вручную. При этом огромный объем информации остаётся неиспользованным из-за невозможности переработки её человеком (по оценке руководителей ГВЦ ОАО «РЖД» из трёх тысяч возможных справок руководители запрашивают не более 15-20). Процесс автоматизации анализа делает лишь первые шаги, и здесь значительной проблемой является отсутствие разработанной теоретической базы.

### 1. Автоматизированная аналитическая система как аппарат для новых видов анализа

Интеллектуальный мониторинг выполняет полезную функцию. Однако на современном этапе этого недостаточно. Нужен более глубокий анализ.

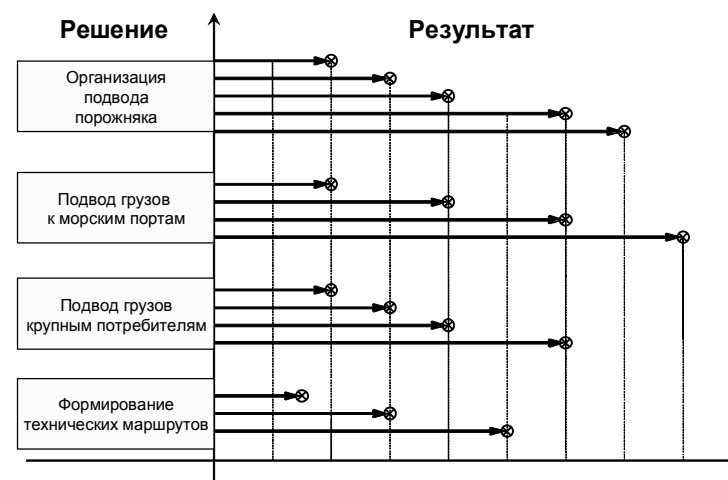


Рис. 1. Разрыв по времени между решением и результатом в основных технологических процессах

Дело в том, что транспортная система страны характеризуется огромными масштабами и сильной структурной и функциональной связностью. Существует временной разрыв между принятием технологических решений и результатами принятой технологии в 5-7 и более суток (рис. 1).

Для того чтобы оценить эффективность выбранной технологии, необходимо мысленно «прогнать» весь процесс от решения до конца реализации и сравнить расчётные и реальные результаты. Человеку это не под силу. Поэтому необходима методология получения достоверного глубокого прогноза. В настоящее время это может быть осуществлено двумя способами.

Первый – это использование информационного хранилища и его аналитического аппарата. Там на основе большой статистики выводятся закономерности движения и переработки транзитных потоков. И по набору параметров состояния транспортной системы на момент принятия решения и полученных закономерностей можно увидеть результат (наш опыт показывает, что вероятность правильной оценки составляет 80-90%) (рис. 2). Этот метод применяется при рассмотрении больших полигонов.

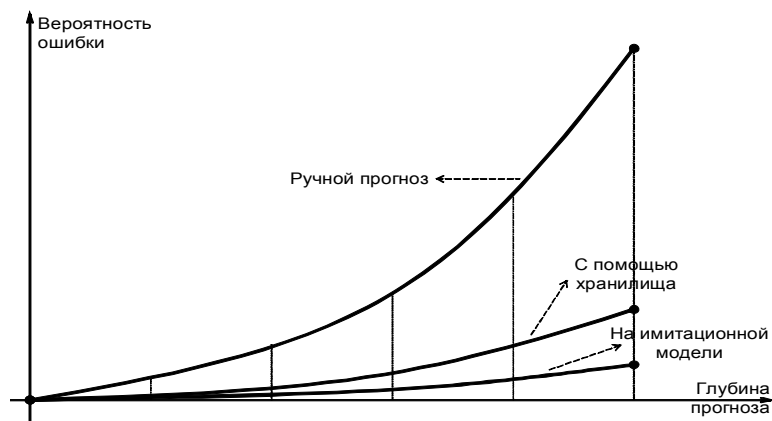


Рис. 2. Сравнительная точность глубокого прогноза разными методами

Для локальных (но сложных) систем, таких как железнодорожные станции и узлы, следует применять *аппарат имитационного моделирования*. Если модель достаточно подробная и построена профессионально, то результат прогноза ещё точнее. Ибо здесь воспроизводится полностью технологический процесс с учётом и случайных факторов, и диспетчерского управления (см. рис. 2). Таким образом, автоматизированная система может выполнять новый вид анализа – *углублённый, как сравнение результатов мониторинга с глубоким прогнозом* (рис. 3).

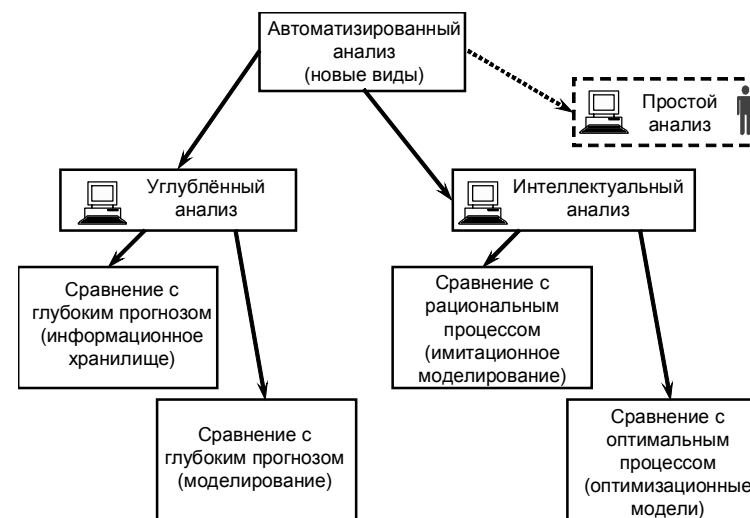


Рис. 3. Новые виды автоматизированного анализа

Однако и этого недостаточно. Дело в том, что в глубоком прогнозе мы сравниваем действия одного диспетчера с решениями другого, т.е. эталоном служит среднестатистические параметры существующей технологии. Необходимо оценить разрыв с оптимальной технологией, наилучшей в данных условиях. Назовём это «идеальным процессом». В этом случае необходимо применять оптимизационные модели. *Сравнение с*

«идеальным процессом» будем называть интеллектуальным анализом (см. рис. 3).

Следует отметить ещё один важный фактор. Автоматизированный анализ должен максимально заменить ручной, то есть работу аналитика. Интерпретация результатов требует глубокого понимания системы. Поэтому нужна *теоретическая модель транспортной системы*, описывающая на понятийном уровне взаимодействие элементов и подпроцессов в ней. Это резко уменьшает разброс возможных оценок и увеличивает достоверность выводов (рис. 4).

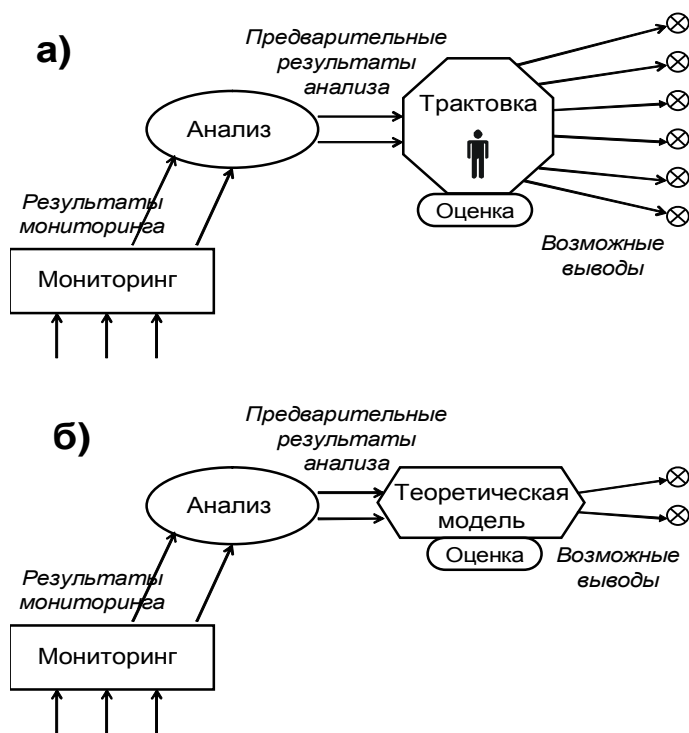


Рис. 4. Интерпретация результатов анализа с теоретической моделью и без неё

## 2. Теоретическая модель транспортной системы – элементы и их взаимодействие

Теоретическая модель по необходимости должна иметь высокий уровень абстрактности. Она призвана отражать закономерности в чистом виде (как, например, в моделях «идеальный газ» или математический маятник). Здесь должна оставаться, если так можно выразиться, суть, не «замутнённая» побочными обстоятельствами.

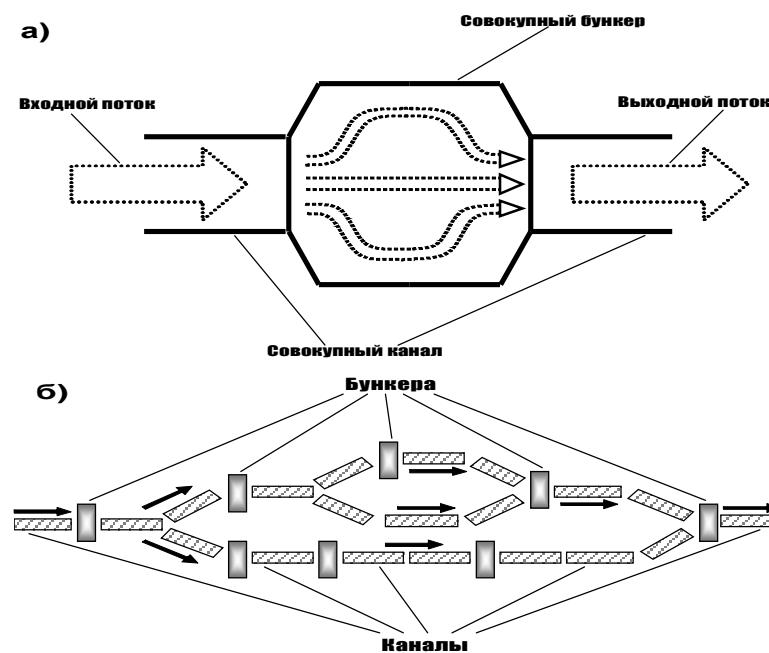


Рис. 5. Теоретическая модель транспортной системы из каналов и бункеров

Абстрактно говоря, задача транспорта – это связь поставщика и потребителя через транспортные потоки. Транспортная связь

должна обеспечить их «комфортное» взаимодействие. Так как в общем случае ритмы их работы не совпадают, то чтобы принять потоки в ритме удобном для отправителя и выдать их в ритме удобном для получателя, транспортная система должна уметь преобразовать потоки. Это означает поглощать и порождать всплески потока.

Таким образом, транспортная система выполняет двойственную функцию – канала для пропуска потоков и бункера для поглощения и порождения всплесков. Поэтому в качестве абстрактных элементов теоретической модели выбраны элементы «канал» и «бункер».

Теоретическая модель транспортной системы должна в первую очередь отражать принципы взаимодействия элементов и подсистем в ней, а также влияние управления на протекающие процессы. Это основные факторы, определяющие выбор решений по улучшению функционирования системы. Это относится к усилению тех или иных элементов для устранения «узких мест» и повышению общей производительности, увеличению адаптивных свойств транспортной системы для работы в условиях высокой динамики (т.е. улучшению управления) и т.п.

Взаимодействие этих элементов в структуре проливает свет на многие технологические процессы в транспортных системах (рис. 5). В теоретической модели вся система представляет собой совокупный канал и бункер (рис. 5 а) и состоит она также из каналов и бункеров, как элементов (рис. 5 б).

На практике каналами являются пути на станциях, перегоны, стрелки, горки и т.д. В качестве бункеров могут выступать резервные пути в парках, склады и др.

Функции канала и бункера противоположны. Чем сильнее выражены свойства канала – тем быстрее идёт пропуск потоков, чем больше развиты свойства бункера – тем более неравномерные потоки могут поглощаться, но тем менее будет их скорость. Оптимальное сочетание этих элементов даёт гармоничную структуру транспортной системы.

Двойственная функция транспортной системы как разветвлённой сети каналов и как демпфера, преобразователя ритмов входных потоков в ритмы выходных, может эффективно выпол-

няться только при грамотно построенной структуре и настроенной на неё технологии. При налаженной технологии элементы структуры – каналы и бункера – имеют вполне определённые пропускные способности и ёмкости, конечно, для потока с заданными характеристиками. Совокупная пропускная способность узла  $D$  будет зависеть от:

- пропускной способности каналов  $d_{ij}$ ;
- вместимости бункеров  $q_l$ ;
- качества структуры  $S$ ;
- характеристик потока – неравномерности, его структуры

и др.  $X$

$$(1) D = f^* (\{d_{ij}\}, \{q_l\}, S, X).$$

Совокупная ёмкость  $Q$ , как свойство поглощать и порождать всплески потока, является функцией ёмкости бункеров  $q_l$ , того, как они связаны в структуру  $S$  и какими каналами  $d_{ij}$ , характера потока  $X$ , а так же развитости управления, то есть величины аналитических резервов, которые оно создаёт

$$(2) Q = f^{**} (\{q_l\}, \{d_{ij}\}, S, X, R).$$

Грамотно построенная структура  $S$  обеспечивает заданную совокупную пропускную способность и требуемую ёмкость при наименьших затратах. Как правило, это предполагает максимизацию и динамических резервов  $R$ .

Таким образом, задача ставится как:

$$(3) F = \sum_i \sum_j d_{ij} \cdot C_{ij} + \sum_l q_l \cdot C_l \rightarrow \min,$$

при ограничениях  $D \geq D^*$ ,  $Q \geq Q^*$ .

$D^*$  и  $Q^*$  – заданные совокупные пропускные способности и ёмкости.

### 3. Теоретическая модель – управление и динамические резервы

Сбалансированная транспортная система предполагает гармоничное сочетание бункеров и каналов. Однако, транспортная система – это не только схема путей и стрелок, но и привязанная к ней технология работы. Совокупные параметры системы, в особенности свойства её, как бункера, зависят и от того, насколько гибкая, управляемая используется технология. Управ-

ление создаёт эффект наличия резервов, иначе – *динамических резервов*. Это наиболее эффективный тип резервов, так как он не увеличивает расходы на развитие инфраструктуры.

Рассмотрим природу динамических резервов. Назовём струёй поток, связывающий конкретного поставщика и потребителя. Если структура потоков жёсткая, т.е. имеется однозначная привязка поставщиков к потребителям, то по каждой струе необходимо иметь резервы вагонов для обеспечения перевозок в условиях неравномерности. Резерв по струе составит:

$$(4) \quad r_i = n_i^{max} - n_i^{cp},$$

где  $n_i^{cp}$  – число вагонов в обороте при постоянном потоке;

$n_i^{max}$  – требуемое число вагонов в обороте при максимальном всплеске потока.

Назовём эти резервы *статическими*. Они представляют собой дополнительное число вагонов, стоящих на резервных путях. Возникают они при поглощении всплесков и включаются в действие при восполнении недостатков.

Если отсутствует взаимодействие струй, то суммарные статические резервы будут равны:

$$(5) \quad R_{cm} = \sum_i r_i^{cm} = \sum_i (n_i^{max} - n_i^{cp}).$$

Полная величина статических резервов требуется только тогда, когда отсутствует управляемое взаимодействие внутри транспорта (между струями) и транспорта с поставщиками и потребителями. Статические резервы замедляют оборот вагонов, требуют значительных капитальных вложений, в конечном счёте, снижают эффективность работы транспорта. Поэтому их надо всемерно снижать (без ущерба для надёжности транспортной связи).

Управление потоками позволяет снизить размеры статических резервов без ухудшения бункерных свойств системы. Чем выше развито управление, тем меньше требуется статических резервов в условиях неравномерности. Так что динамические резервы – это резервы управления. Размеры их определяются величиной, на которую можно уменьшить статические резервы. Динамические резервы не требуют дополнительных вагонов и путей, и поэтому их увеличение повышает эффективность работы транспорта.

#### 4. Устойчивое состояние транспортной системы и её поддержание

Интеллектуальный анализ должен обнаруживать за, казалось бы, неупорядоченными событиями закономерности или, как говорят, «увидеть за деревьями лес». Система имеет свои законы функционирования и её реакция на те или иные воздействия будет предсказуема, если эти законы известны. Одним из важнейших свойств успешно работающей транспортной системы является поддержание устойчивого состояния. Рассмотрим в самом общем виде это свойство и соответствующие реакции системы. Управление в системе в значительной мере направлено на поддержание устойчивого состояния.

В общем случае состояние  $S(t)$  описывается как:

$$(6) \quad S(t) \equiv (\tilde{S}(t), \mathcal{S}(t)),$$

где  $\tilde{S}(t)$  – состояние инфраструктуры;  $\mathcal{S}(t)$  – наполнение инфраструктуры, т.е. потоки в сети и вагоны (составы) в межоперационных простоях.

Транспортная система, представленная в самом общем виде из каналов и бункеров будет иметь вид, представленный на рис. 6. В этой потоковой модели отражены основные этапы движения транспортных потоков.

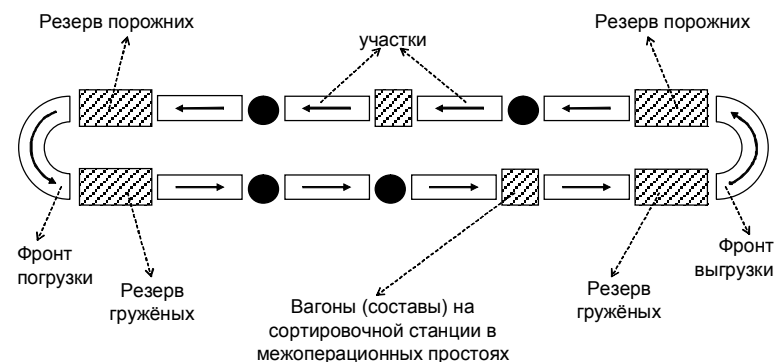


Рис. 6. Представление транспортной системы в виде сети каналов и бункеров

Состояние и наполнение инфраструктуры может быть описано следующим образом:

♦ состояние инфраструктуры –  
(7)  $\tilde{S}(t) \equiv \left\{ \{U_i(t)\}, \{Q_j(t)\} \right\}$ ,

где  $U_i(t)$  – пропускная способность канала в момент  $t$ ;

$Q_j(t)$  – вместимость бункера;

♦ наполнение инфраструктуры –  
(8)  $\tilde{S} \equiv \left\{ \{u_i(t)\}, \{q_j(t)\} \right\}$ .

где  $u_i(t)$  – поток в  $i$ -ом канале;  $q_j(t)$  – наполнение  $j$ -ого бункера;

Устойчивое состояние будем понимать в обычном для теории управления смысле. Когда малое воздействие не приводит к большим отклонениям состояния и не ведёт к катастрофическим последствиям. То есть устойчивое состояние – это точка в  $n$ -мерном пространстве, заданная  $n$  параметрами (обозначим их со звёздочкой “\*”).

(9)  $S^*(t) \equiv \left\{ \{U_i^*(t)\}, \{Q_j^*(t)\}, \{u_i^*(t)\}, \{q_j^*(t)\} \right\}$

В устойчивом состоянии система работает с согласованными технологическими параметрами (величина потоков и число локомотивов, загрузка сортировочных горок и др.) в устойчивом состоянии  $S^*(t)$  параметры системы находятся достаточно далеко от «опасных» границ.

а) для инфраструктуры:

(10)  $\forall i | \underline{U}_i \leq U_i \leq \overline{U}_i;$   
 $\forall j | \underline{Q}_j \leq Q_j \leq \overline{Q}_j;$

б) для наполнения:

(11)  $\forall i | \underline{u}_i(t) \leq u_i(t) \leq U_i(t);$   
 $\forall j | \underline{q}_j(t) \leq q_j(t) \leq Q_j(t).$

Состояние инфраструктуры определяется совокупностью состояний её элементов:

(12)  $U_i(t) \equiv \left\{ \{s_i^{nym}(t)\}, \{s_i^{aem}(t)\}, \{s_i^{лок}(t)\} \right\},$

где  $s_i^{nym}(t)$  – состояние путевого хозяйства;

$s_i^{aem}(t)$  – состояние устройств автоматики и связи;

$s_i^{лок}(t)$  – состояние локомотивного хозяйства (возможность

обеспечения локомотивами движения на участке), включая расположение локомотивов на полигоне.

(13)  $Q_j(t) \equiv \left\{ \{s_j^{nym}(t)\}, \{s_j^{aem}(t)\} \right\}.$

Теперь мы подошли к пониманию реакций транспортной системы на отклонение её состояния от устойчивого. По сути, управление в целом будет иметь четыре основных составляющих:

1)  $\tilde{Y} \equiv \{ \tilde{y}_k \}$  – направленное на поддержание состояния инфраструктуры, близкого к устойчивому, где  $\tilde{y}_k$  – решение по поддержанию, соответственно, путевого хозяйства, устройств автоматики и связи, локомотивного хозяйства, в том числе переброска локомотивов.

2)  $\dot{Y} \equiv \{ \dot{y}_n \}$  – решение по поддержанию ритмов работы сети.

3)  $\dot{Y} \equiv \{ \dot{y}_m \}$  – решение по управлению грузопотоками. Ибо  $u_i(t) \equiv \{ \dot{u}_i^i(t) \}$  где  $\dot{u}_i^i(t)$  – струя грузопотока. Так что при одном и том же потоке  $u_i(t)$  на участке (полигоне) множество грузовых струй  $\dot{u}_i^i(t)$  может быть разным.

4)  $\dot{Y} \equiv \{ \dot{y}_p \}$  – управление потоками порожняка. Ибо поток порожняка  $u_i(t)$  может состоять из разных струй вагонов  $u_q^i(t)$ , т.е.  $u_i(t) \equiv \{ u_q^i(t) \}.$

Таким образом, зная параметры устойчивого состояния и наблюдая в процессе мониторинга существенное отклонение от него по некоторым параметрам в сторону «опасных» границ, можно ожидать управляющей реакции транспортной системы по удалению её состояния от них. Анализ может показать насколько успешно диспетчерский аппарат это сделал, а также насколько широк набор реакций, т.е. технологических приёмов для обеспечения необходимой адаптивности системы в динамических условиях.