

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

УДК 656.073.21

*А. А. МИХАЛЬЧЕНКО, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

### ВЛИЯНИЕ ЭНТРОПИИ ИНФОРМАЦИИ ПО ЭЛЕМЕНТАМ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ПЛАНИРОВАНИЕ РЕСУРСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Приводятся результаты теоретических исследований влияния энтропии информации по элементам перевозочного процесса на планирование ресурсного обеспечения выполнения эксплуатационной работы подразделениями железной дороги. Рассмотрена модель информационного обеспечения оперативного управления перевозками по технологическим элементам железной дороги с учетом рассмотрения её в качестве сложной системы со всеми присущими её особенностями. Определены свойства энтропии информации в системе оперативного управления работой железнодорожного транспорта и особенности её влияния на ресурсное обеспечение перевозочного процесса в каждой технологической подсистеме, занятой в транспортной деятельности железнодорожного транспорта. Выделены граничные состояния технологических подсистем, при которых влияние энтропии на результативность планирования ресурсного обеспечения перевозочного процесса принимает максимальное или минимальное значение. Её влияние в практической работе железной дороги приводит к завышенным издержкам, получаемым при создании новой системы управления работой железнодорожного транспорта в целом и, в частности, перевозками грузов и пассажиров. Выделены критерии использования расчетных значений энтропии состояний технологических объектов железнодорожного транспорта в системе оперативного планирования для ресурсного обеспечения перевозок с использованием корректирующих коэффициентов, зависящих от объемов работы, периода года, эффективного использования ресурсов предприятий железнодорожного транспорта.

**П**ланирование ресурсов по основной деятельности железной дороги и её структурных подразделений в полной степени адекватно отражает технологические процессы, выполняемые в инфраструктурных подсистемах железнодорожного транспорта с учетом времени опережения событий оперативного характера. При разработке оперативного плана перевозок одновременно рассматривается ресурсное обеспечение железной дороги. Определяются потребные ресурсы для выполнения перевозочного процесса на железнодорожных участках, в узлах, направлениях и по железной дороге в целом, используется информация о выполнении технологического процесса перевозки по элементам применяемой технологии, которая рассматривается до момента наступления событий, связанных с перевозочным процессом и в период их происхождения.

Вследствие наличия изменений, которые возникают при выполнении перевозочного процесса и которые обычно невозможно предусмотреть при первоначальной разработке оперативного плана перевозки, а также заблаговременно внести необходимые изменения в план, оперативные планы подвергаются частым изменениям и корректировкам. При этом ресурсная составляющая изменяемой части оперативного плана перевозок корректируется с большим опозданием, что в итоге приводит к завышенным затратам ресурсов, направляемых на выполнение перевозок.

Современные условия работы организаций железнодорожного транспорта отличаются наличием

высокой интенсивности движения грузовых поездов, их повышенной массы, длины и высоких скоростей движения пассажирских поездов. При этом на части полигона железной дороги выполняется значительный объем погрузки (на отдельных станциях полигона железной дороги).

В последние годы к первым двум условиям добавляется ограниченное наличие ресурсов у железнодорожной администрации. С учетом вышеприведенных условий к оперативному планированию перевозок на железнодорожном транспорте предъявляется дополнительное требование по определению достаточного горизонта планирования количественных измерителей эксплуатационной работы и с достаточной точностью установления моментов возникновения затруднений по выполнению перевозок, определения изменений в ресурсном обеспечении перевозочного процесса. В новых условиях функционирования железнодорожного транспорта требуется оперативно выявлять узкие места в технологическом процессе, которые в дальнейшем могут привести к значительному потреблению ресурсов, не предусмотренному на стадии раннего планирования. Информация о поведении и предполагаемом состоянии любой из технологических подсистем железной дороги в таком состоянии обладает некоторой степенью неопределенности.

Влияние неопределенности информации на планирование и оперативное управление ресурсами, направляемыми на выполнение перевозок железнодорожным транспортом, в настоящее время

мало изучено, и механизм его использования для большинства работников железнодорожного транспорта непонятен.

Можно говорить о влиянии развития систем автоматизированного управления различными элементами процесса перевозки на снижение неопределенности информации, но все используемые в настоящее время АСУ перевозочного процесса и его элементов не интегрируют в достаточной степени первоначальную и промежуточную информацию, обеспечивающую точное знание потребности в ресурсах, необходимых для выполнения перевозок грузов и пассажиров. В итоге, согласно проведенным исследованиям за последние пятнадцать лет на нескольких железных дорогах России, Украины, Казахстана и Белорусской железной дороге, отмечен значительный перерасход ресурсов, направляемых на выполнение перевозочного процесса. Это привело к росту убыточности перевозок грузов и пассажиров по всем видам сообщений и активизации перекрестного финансирования убытков железной дороги за счет более доходных видов ее деятельности.

В качестве автономных объектов оперативного планирования или их структурных элементов при формировании плановых значений эксплуатационных измерителей рассматриваются стыковые пункты технологических подсистем железной дороги. Они распределены на три уровня: линейных предприятий, отделений железной дороги, управления (администрации) железной дороги. Если оценивать структурно-функциональную схему оперативного планирования измерителей эксплуатационной работы, то можно отметить, что каждому уровню планирования эксплуатационной работы соответствует определенный технологический полигон, для которого ставятся задачи, отличие которых заключается в глобальности определяемых целей и их ресурсного обеспечения.

Каждый объект планирования на железнодорожном транспорте взаимозависимо связан с объектами одинакового или более высокого ранга (взаимосвязь смежных участков, промежуточной станции и участка, пограничного участка собственной и смежного участка железной дороги соседнего государства). Любой из выделенных в системе ранжирования объектов в качестве условно самостоятельного элемента может рассматриваться как простая технологическая система ( $S_i$ ). Она может принимать в реальном времени различные внутренние состояния под воздействием внутренних и внешних факторов. При этом под технологическим состоянием такой системы следует понимать:

- наличие и месторасположение в ней вагонов, поездов, локомотивов, грузов и пассажиров;
- внешние воздействующие факторы, которые включают заявку на прием или сдачу поезда, погрузку (выгрузку) груза или посадку (высадку) пассажиров;
- внутрисистемные факторы, определяющие величину рабочего парка вагонов и локомотивов по

отношению к нормативной их величине, техническое состояние технологических подсистем (наличие ограничений по их использованию по инженерным параметрам);

– эффективный менеджмент, наличие и использование информационных технологий, инновационных схем управления предприятием.

Простая технологическая железнодорожная система может принимать в плановом периоде случайные состояния  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_k$  ( $s_k \in S_i$ ), которые не всегда могут быть предусмотрены в оперативном плане. В таком случае для информации, отражающей эти состояния, всегда присуща степень неопределенности, которая характеризуется количеством возможных состояний и вероятностями наступления одного из них. В качестве пояснения данного размышления можно рассмотреть процесс планирования и реализации продвижения грузового поезда по железнодорожному участку, когда при множестве возможных исходов (проследование по плану-графику без отклонений; выполнение работы с поездом на промежуточных станциях участка – проведение отцепок и прицепок вагонов на этих станциях; нарушение графика движения).

Диспетчер узнает об одном из этих исходов через определенный промежуток времени ( $t_1$ ), по истечении которого может быть выполнена корректировка плана дополнительного привлечения ресурсов железной дорогой на выполнение перевозочного процесса на конкретном участке. К мерам ресурсного характера относятся: использование маневрового локомотива, дополнительная подсылка поезда локомотива для выполнения маневровых передвижений, использование локомотивов по системе многих единиц, ограничение в движении других поездов, находящихся в этот период времени на участке в зоне принятия решений по выходу из конфликтных ситуаций.

Вышестоящие менеджеры уровня отделения железной дороги по оперативному управлению перевозками получают данную информацию через определенный период  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ). На первом уровне управления такая информация появится через промежуток времени  $t_n$  ( $t_n > t_2 > t_1$ ). Поэтому в процессе принятия менеджерами по управлению движением поездов каждого уровня в момент  $t_1$  для них информация о событии, произошедшем на участке, обладает некоторой неопределенностью – энтропией. При оперативном планировании эксплуатационной работы возникает необходимость получения менеджером достаточной информации о предполагаемом количестве случайных состояний технологических подсистем, задействованных в перевозочном процессе, а также значений вероятности их происхождения.

С учетом изложенного в качестве меры априорной неопределенности состояний объектов оперативного планирования на железнодорожном



где  $i$  – количество технологических объектов (станций, участков), для которых рассматривается энтропия их состояния;  $j$  – количество отделений на железной дороге;  $t_n$  – момент изменения состояния каждого технологического объекта (станции, перегона, участка) и отделения в целом, приводящий к новому состоянию железной дороги и новым потребностям в ресурсах.

Необходимо учитывать, что на железнодорожном транспорте технологические подсистемы относятся к категории взаимозависимых и взаимовлияющих друг на друга сложных систем. Вследствие этого определение энтропии состояния объединенной технологической системы путем простого суммирования является неприемлемым. Поэтому общая энтропия состояний таких объединенных систем будет всегда меньше, чем сумма энтропий её составных частей. Для нахождения энтропии состояния сложной технологической системы, состоящей из ряда взаимозависимых технологических элементов железнодорожного транспорта, используется условная энтропия, которая означает, что если отделение железной дороги  $A$  приняло состояние  $a(t_n)$  при  $t_n \in T_{пл}$ , то условная вероятность того, что с выходных участков смежного отделения будут приняты поезда, и его состояние будет  $b(t_n)$  при условии нахождения отделения  $A$  в состоянии  $a(t_n)$  будет равна

$$p[b(t_n) | a(t_n)] = p[B(T_{пл}) \sim b(t_n) | A(T_{пл}) \sim a(t_n)]. \quad (8)$$

Условная энтропия состояния отделения  $B$  при условии, что отделение  $A$  оказалось в состоянии  $a(t_n)$ , определяется как

$$H[B | a(t_n)] = - \sum p[b(t_n) | a(t_n)] \log_2 p[b(t_n) | a(t_n)]. \quad (9)$$

Для одних состояний при выполнении эксплуатационной работы условная энтропия  $H[B | a(t_n)]$  по отделению  $B$  будет больше, для других меньше, а в целом её величина зависит от того, какое из множества состояний  $a(t_n)$  примет отделение  $A$  в момент принятия плановых решений по использованию ресурсов при выполнении перевозочного процесса. В результате полное значение энтропии для отделения  $B$  с учетом того, что это отделение может принимать разные состояния, будет равно сумме произведений каждой условной энтропии на вероятность соответствующего состояния  $p_a$ :

$$H(B | A) = - \sum p_a [B | a(t_n)]. \quad (10)$$

В соответствии с теорией вероятностей решение (10) выглядит следующим образом;

$$P_{a,b} = p_a p[b_m(t_n) | a(t_n)], \quad (11)$$

что позволяет преобразовать выражение (9), и оно примет вид

$$H[B(T_{пл}) | A(T_{пл})] = - \sum_1^k \sum_1^m p_b [\log_2 p_{a,b}(b(t_n) | a(t_n))], \quad (12)$$

или с учетом дальнейшего использования в расчетах потребности ресурсов

$$H[B(T_{пл}) | A(T_{пл})] = - \sum_1^m p_{a,b} \log_2 p_{a,b}. \quad (13)$$

Величина  $H[B(T_{пл}) | A(T_{пл})]$  характеризует степень неопределенности состояния эксплуатационной работы на отделении  $B$ , остающуюся после полной конкретизации состояния эксплуатационной работы на отделении  $A$  с минимальной неопределенностью наступления последующих событий в плановом периоде и внесении изменений целевых показателей планирования на весь плановый период  $T_{пл}$ . При планировании технологии выполнения и достигаемой результативности эксплуатационной работы на отделениях железной дороги всегда имеет место неопределенность о состоянии и последовательности изменения состояний одной из его технологических подсистем при известном состоянии другой (других). Например, результативность работы поездного участка определяется регламентом работы ограничивающих и промежуточных станций по приему, пропуску поездов, проведению маневровых передвижений на промежуточных станциях и т. д. Так, для отделения железной дороги, железной дороги в целом характерным является прием или сдача поезда по плану или с его нарушением, наличие качественной информации о структуре вагонного парка в этих поездах (особенно по приему), график продвижения поездов по участкам. При наличии качественной информации и данных событиях можно определить: объемы потребных ресурсов, необходимые для выполнения перевозочного процесса; доходную составляющую каждого подразделения железнодорожного транспорта с учетом величины отраслевого измерителя (тарифные тонно-километры или пассажиро-километры по видам сообщения).

При планировании результативности эксплуатационной работы по периодам для каждого технологического подразделения всегда имеет место объединение информации о состоянии нескольких технологических подсистем более низкого ранга, потребности в ресурсах и результативности в доходах, полученных по основной деятельности (от перевозок грузов и пассажиров). В границах полигона железной дороги виртуальное объединение нескольких технологических подсистем предусматривает интеграцию информации от нескольких отделений. Для Белорусской железной дороги характерным является объединение трех отделений при работе с транзитом и двух при работе с экспортными и импортными грузами. Для местного сообщения характерно использование виртуального объединения двух-трех отделений железной дороги. Для Украинских железных дорог, где основную роль играют направления протяженностью 1200–1600 км, используется виртуальная интеграция двух-трех железных дорог, что требует более четкого представления о наличии и использовании ресурсов этих дорог для выполнения перевозочного процесса на конкретном направлении.

Энтропия такой объединенной системы, состоящей из нескольких отделений,

$$H(A, B) = H(A) + H(B), \quad (14)$$

т. е. она в таком случае равна сумме энтропии, полученной для одного отделения, и условной энтропии, полученной для второго отделения относительно первого. Для железнодорожного направления правомерно и обратное рассмотрение выражения (14), с учетом того, что

$$H[A(T_{пл}), B(T_{пл})] = H[B(T_{пл})] + H(A(T_{пл})|B(T_{пл})). \quad (15)$$

Для железной дороги в целом, которая объединяет несколько отделений железной дороги, энтропия состояния определяется как сумма

$$H[A(T_{пл}), B(T_{пл})] = H[A(T_{пл})|A_1, A_2, \dots, A_{k-1}(T_{пл})]. \quad (16)$$

По зависимости (16) энтропия состояния каждого последующего отделения железной дороги вычисляется при условии, что состояние предыдущего по ходу изменения эксплуатационного состояния отделения известно. В соответствии с выражениями (15) и (16) энтропия состояния эксплуатационной работы на железной дороге достигнет максимального значения в случае, если её составные части независимы, что практически невозможно, так как отделения являются элементами сложной технологической системы. В таком случае максимальное значение энтропии состояния технологических объектов железной дороги является недостижимым. При условии, когда состояния эксплуатационной работы отделения железной дороги полностью определяется через влияющие факторы, связанные с состоянием другого отделения, то энтропия состояния объединенной системы равна энтропии одного отделения железной дороги, т. е.

$$H[A(T_{пл}), B(T_{пл})] = H[A(T_{пл})]. \quad (17)$$

При этом следует отметить, что при наличии эквивалентных технологических подсистем, когда состояние каждой из них однозначно определено состоянием другой технологической подсистемы, энтропия состояния объединенной системы равна энтропии состояния эксплуатационной работы каждой подсистемы.

Численное значение энтропии состояний технологических объектов планирования зависит от периодов отдалённости реализации планов. Вычисляя энтропию состояния эксплуатационной работы, определяют состояние технологического объекта планирования на данный и последующие моменты времени с учетом необходимой продолжительности реализации плана. При рассмотрении энтропии входных и выходных потоков поездов, энтропии технологического состояния правомочно использование выражений (1) – (17), в которых изменяющейся частью будет только значение вероятностей описываемых событий.

Использование расчетных значений энтропии состояний технологических объектов железнодорож-

ного транспорта при корректировке оперативного плана поездной работы для подсистем железнодорожного транспорта производится путем применения корректирующих коэффициентов ресурсного обеспечения по элементам:

- эксплуатация вагонов грузового и пассажирского парков – по двум факторам: пробега и продолжительности коммерческой эксплуатации;

- эффективность тягового обслуживания перевозочного процесса и применения мотор-вагонного подвижного состава для пассажирских перевозок – по нормативам пробега и продолжительности коммерческой эксплуатации электровозов и тепловозов, использованию локомотивных бригад по видам тяги;

- технологического ресурса инфраструктуры – по факторам тоннажа (нагрузки на устройства пути и искусственных сооружений) и вагоно-килограмм, локомотиво-килограмм локомотивов, следующих в голове поездов, в одиночном следовании, поездок локомотивов мотор-вагонного подвижного состава;

- потребление топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов – по фактору тоннажа брутто для локомотивной тяги и наличии электрической передачи (тяговых электродвигателей у электровозов, тепловозов и электропоездов) и затратам на 100 км пробега при наличии механической передачи у дизель-поездов.

Ресурсное обеспечение эксплуатации вагонов грузового и пассажирского парков предусматривает корректировку плановых значений по фактору оплаты труда персонала, занятого на предприятиях железной дороги по техническому обслуживанию и ремонту собственных вагонов грузового и пассажирского парков.

Тяговое обслуживание грузовых и пассажирских перевозок предусматривает 32–35%-ное ресурсное обеспечение, которое отражается соответственно в тарифе на перевозки. Оно корректируется при планировании перевозок с учетом нормативов на техническое обслуживание и ремонт поездных локомотивов грузового и пассажирского движения собственной приписки. При этом корректировке подлежат потребности трудовых ресурсов в зависимости от продолжительности эксплуатации локомотивов, увязанной со скоростями движения грузовых и пассажирских поездов.

Наиболее сложным является процесс корректировки потребностей оперативного плана перевозки в ресурсах для инфраструктурного обеспечения. Рассматриваются два измерителя – пропущенный тоннаж и пробеги подвижных единиц железнодорожного транспорта, что несет в себе значительную долю неопределенности информации о состоянии подвижных объектов, которая усложняет проведение корректировочных расчетов ресурсного обеспечения работоспособности инфраструктуры при устойчивости выполнения оперативного плана перевозок. Невыполнение условия ресурсного обеспечения приводит к значительному (в 1,5–2 раза) перерасходу де-

нежных средств на выполнение перевозок грузов и пассажиров.

### **Выводы.**

Ресурсное обеспечение оперативного плана эксплуатационной работы для подразделений железнодорожного транспорта является сложной технологической задачей, от качества решения которой зависит экономическая устойчивость работы организаций железнодорожного транспорта. С учетом того, что информация о состоянии объектов оперативного планирования обладает уровнем неопределенности, при ресурсном обеспечении оперативного плана поездной и грузовой работы требуется учитывать влияние энтропии, используемой для планирования информации. При этом:

– оперативное состояние технологических объектов оперативного планирования при наличии неопределенности информации хорошо описывается математически, что дает возможность вычислять значения энтропии, которые следует учитывать при оперативном планировании;

Получено 23.03.2011

**A. A. Mikhailchenko.** Effect entropy information on elements of road planning process for reserves operational work of the railroad.

The results of theoretical studies of the effect of entropy of information on the elements of the transportation process to ensure that the resource planning of operational work units of the railway. A model of information provision of operational traffic management on the technological elements of the railway, taking into account the consideration of it as a complex system with all of the its features. Determined by the properties of entropy information in the operational railway management, and particularly its impact on resource provision of the transportation process in each processing subsystem employed in the transport of rail transport. Marked the boundary conditions and technological subsystems, for which the effect of entropy on the effective planning of resource to ensure the transport process takes the maximum or minimum value. Her influence in the practical work of the railway leading to inflated costs, resulting from the creation of a new system of railway management in general and in particular the transportation of cargo and passengers. Identified criteria for the use of calculated values of entropy of states of technological facilities of railway transport in the system of operational planning for resource provision of transport using the correction factors that depend on the amount of work, period of the year, the effective use of resources of enterprises of railway transport goad.

– ресурсное обеспечение плановых измерителей эксплуатационной работы при наличии энтропии информации о состоянии технологических объектов формируется с учетом правил описания сложных систем, приемлемым для объединенной технологической системы.

### **Список литературы**

1 Деннис, Д. К. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / Д. К. Деннис, Р. М. Шнабель. – М. : Мир, 1988. – 256 с.

2 Михальченко, А. А. Совершенствование взаимодействия видов транспорта при наличии ограничений использования коммуникаций / А. А. Михальченко // Развитие региональных транспортных коммуникаций : сб. науч. тр. – Красноярск : КТУ, 2005. – С. 205–209.

3 Михальченко, А. А. Инвестирование в подвижной состав и развитие технических устройств в условиях ограниченных ресурсов железной дороги / А. А. Михальченко // Проблемы оценки эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте: материалы науч.-метод. конф. – СПб. : ПГУПС, 2001. – С. 23–25.

4 Михальченко, А. А. Разработка стратегий развития транспортных систем регионов с учетом ресурсного фактора / А. А. Михальченко // Политранспортные системы : материалы VII Всерос. науч.-техн. конф., Красноярск, 25–27 ноября 2010 г. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. – С. 85.