

*Р.В. Вернигора, доцент, Л.О.Ельникова, аспирант, Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепрпетровск, Украина*

## **ПРОБЛЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА УКРАИНЫ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

В статье рассмотрена разработанная методика расчета оперативного плана работы локомотивного парка. Методика основана на решении многокритериальной задачи о назначениях, что позволяет учитывать множество факторов, влияющих на эффективность оперативного плана работы локомотивов и бригад.

**Введение.** В современных рыночных условиях эффективное функционирование любого предприятия невозможно без адекватного и качественного прогнозирования условий его работы. Ведь именно на основании такого прогноза осуществляется планирование работы предприятия, оцениваются возможные риски и разрабатываются наиболее эффективные модели функционирования, соответствующие прогнозируемой ситуации. Очевидно, что получение качественного прогноза и составление на его основе плана работы невозможно без использования современных математических методов и информационных технологий.

На железнодорожном транспорте одной из актуальных проблем в настоящее время являются случаи нерационального планирования работы тягового подвижного состава, что приводит к непроизводительным простоям на технических станциях как составов с вагонами, так и поездных локомотивов и локомотивных бригад. Эффективное оперативное планирование работы локомотивов и локомотивных бригад может быть реализовано на базе адаптивной системы оперативного управления работой локомотивного парка. Основной задачей такой системы является разработка оперативных планов работы локомотивов и бригад с целью уменьшения непроизводительных простоев и связанных с этим расходов.

**Анализ литературных данных и постановка задачи исследования.** Наиболее эффективным направлением совершенствования работы железнодорожного транспорта и локомотивного хозяйства в частности, является использование современных систем принятия решения и оперативное планирование [1, 2]. Автоматизированные рабочие места (АРМ) работников локомотивных депо, диспетчерского аппарата отделений и управлений железных дорог являются одним из эффективных элементов, которые используются при оперативном планировании работы локомотивов и локомотивных бригад. Однако, как указано в работе [3], в настоящее время эксплуатируемые АРМы имеют существенные недостатки в части функций, касающихся эксплуатации локомотивов и планирования работы бригад.

Одним из основных этапов разработки оперативного плана работы локомотивного парка является задача определения наиболее рациональной схемы закрепления локомотивов, бригад и составов грузовых поездов друг к другу, а также поездов к ниткам графика. Следует отметить, что данной проблеме

посвящено достаточно много работ. Например, в работах [4, 5] состав сначала обеспечивается локомотивом, а затем назначается бригада, а в [6] данная проблема рассматривается в условиях технологии движения грузовых поездов по расписанию, когда нитка графика движения сначала обеспечивается локомотивом и бригадой, а к ним затем прикрепляется состав. Научная работа [7] посвящена оптимизации работы локомотивных бригад при назначении их к поездам (составы с локомотивами). Следует отметить, что перечисленные выше работы выполнены учеными Российской Федерации, где в течение нескольких последних лет внедряется «жесткий» график движения грузовых поездов; в Украине же такая технология остается пока только в перспективе. В работе [8] оптимизация работы локомотивов рассматривается как «задача о назначении», где локомотивы с бригадами назначаются к составам, при этом, не учитываются локомотивы на подходах к станции, а также не рассмотрена методика прикрепления бригад к локомотивам.

Необходимо отметить, что в настоящее время существующая в Украине система оперативного управления тяговым подвижным составом нередко демонстрирует свою неэффективность, а планирование работы локомотивов и локомотивных бригад зачастую выполняется без учета многих влияющих факторов, в т.ч. экономической составляющей, на основе лишь собственного опыта, навыков, интуиции поездных и локомотивных диспетчеров. Следствием такого подхода являются нерациональные расписания явок локомотивных бригад и планы закрепления локомотивов за составами, что в итоге приводит к увеличению непроизводительных простоев составов на станциях и снижению эффективности использования локомотивов. Так, например, на практике далеко не редки случаи явки локомотивных бригад в отсутствие готовых к отправлению составов.

Кроме того, за годы независимости локомотивный парк Украины сократился на 30%, а износ магистральных локомотивов превысил 90% [9]. Такая ситуация часто приводит к дефициту тяговых ресурсов, особенно, в пиковые периоды перевозок. В этой связи особую актуальность для железных дорог Украины приобретают вопросы совершенствования и повышения эффективности технологии оперативного управления наличным локомотивным парком в условиях ограниченности тяговых ресурсов. При этом основными направлениями решения данной задачи являются разработка эффективных оперативных планов подвязки

поездных локомотивов под составы, а также рациональное планирование явок и рабочего времени локомотивных бригад. Решение этих вопросов представляет весьма сложную задачу и невозможно без применения современных математических методов анализа, прогнозирования [10], оптимизации и моделирования сложных систем.

**Прогнозная модель поездной работы железнодорожного направления.** Качественный оперативный план работы локомотивного парка должен

базироваться на основе моментов готовности локомотивов, бригад и составов, которые можно получить из прогнозной модели поездной работы направления. Разработанная прогнозная модель поездной работы железнодорожного направления включает блок формирования входной информации, модуль прогноза прибытия поездов, модули прогнозирования работы локомотивов и бригад, а также имитационную модель станции и математическую модель локомотивного депо (см. рис. 1).



Рисунок 1 – Структура прогнозной модели поездной работы железнодорожного направления

Блок формирования входной информации содержит данные о времени отправления поезда со смежной технической станции, сведения о категории и массе поезда, а также данные о локомотиве и бригаде (тип локомотива, время проведения последнего ТО-2, время явки локомотивной бригады и т.д.). В реальных условиях работы эти данные получают в оперативном режиме из имеющихся информационных систем (например, АСКГП УЗ-Е).

Результаты выполненных исследований [11, 12] свидетельствуют, что в современных условиях неравномерность в работе железнодорожного транспорта (внутрисуточная, недельная и сезонная) имеет большее влияние на продолжительность движения поездов между техническими станциями, чем такие параметры поездов, как тип локомотива и масса состава. Это свидетельствует о том, что время нахождения в движении поездов с одинаковыми параметрами может существенно отличаться в зависимости от времени и даты их отправления со смежной технической станции. Вместе с тем, среди рассмотренных факторов не было обнаружено такого, который бы имел существенно более сильное влияние на время движения поездов, по сравнению с другими факторами. В связи с этим можно сделать вывод, что для получения более точного прогноза моментов прибытия поездов на технические станции необходимо

учитывать все рассмотренные факторы при определении продолжительности движения поездов на железнодорожном направлении. Точный прогноз моментов прибытия поездов на технические станции является основой эффективного функционирования прогнозной модели работы направления в целом. Поэтому, задачей модуля прогноза прибытия поездов является расчет прогнозных моментов прибытия поездов на технические станции направления с учетом всех факторов, влияющих на продолжительность движения грузовых поездов на участках.

Для расчета прогнозной продолжительности движения поездов между техническими станциями направления был использован аппарат искусственных нейронных сетей, который является эффективным современным средством прогнозирования. Аппарат искусственных нейронных сетей, как один из эффективных современных математических методов анализа, прогнозирования и моделирования сложных процессов, используется в самых разных сферах производства и услуг. Нейросети нашли свое применение как при прогнозировании показателей работы транспорта, например, объемов перевозок грузов [13], так и при моделировании работы железнодорожного транспорта [14].

В данной работе использована нейросеть типа перцептрон, принцип функционирования которой



движения. Следует отметить, что именно такой порядок в подавляющем большинстве случаев применяется на железных дорогах Украины при разработке оперативных планов работы локомотивного парка.

Исходными данными задачи являются:

- прогнозные моменты готовности локомотивов и бригад к выполнению ТО-1, а также прогнозные моменты готовности составов различных категорий к отправлению;
- сведения о наличии приоритетных составов, простой которых в ожидании отправления должен быть минимален;
- график движения поездов на направлениях;
- ограничения по времени работы локомотивов (для своевременного проведения различных видов технического обслуживания и ремонта);
- ограничения по времени работы локомотивных бригад (для соблюдения норм продолжительности труда и отдыха);
- ограничения по тяговым плечам работы локомотивов, а также по плечам оборота бригад.

В качестве критерия эффективности, на основе которого осуществляется оценка вариантов, целесообразно выбрать совокупные расходы  $C$ , связанные с простоями локомотивов, бригад и составов грузовых поездов в ожидании отправления. Расходы  $C$  учитывают как продолжительность простоя локомотивов, бригад и составов, так и, собственно, стоимость этих простоев.

Итак, в общем виде задача по разработке оперативного плана работы локомотивного парка может быть сформулирована следующим образом: имеются множества бригад  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_i\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , локомотивов  $L = \{L_1, L_2, \dots, L_j\}$ ,  $j = 1, \dots, m$ , а также множество составов  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_u\}$   $u = 1, \dots, v$ , где  $n$ ,  $m$ ,  $v$  – соответственно, количество бригад, локомотивов и составов за период планирования. Необходимо для каждого состава назначить по одному локомотиву и локомотивной бригаде, а также определить нитку графика для отправления; в свою очередь, каждый локомотив и бригада могут обслуживать только один состав, на одну нитку графика движения поездов может быть назначен только один поезд.

Поскольку на каждом этапе целью задачи является минимизация расходов, связанных с непродуктивным простоем бригад, локомотивов и составов грузовых поездов, целевая функция имеет следующий вид:

$$C = C_1 + C_2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $C_1$  – расходы, полученные на I-м этапе решения задачи при назначении бригад к локомотивам;

$C_2$  – расходы, полученные на II-м этапе решения задачи при назначении локомотивов с бригадами для обслуживания составов.

Исходя из математической постановки задачи и вида целевой функции, наиболее целесообразно решать данную задачу разработки оперативного плана работы локомотивного парка как «задачу о назначениях»; при этом может быть использован Венгерский метод [17].

На первом этапе необходимо назначить бригады к имеющимся локомотивам, чтобы минимизировать суммарные расходы, связанные с простоем локомотивов и бригад:

$$C_1 = \sum_{i,j=1}^{n,m} c_{ij} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $c_{ij}$  – расходы, связанные с назначением  $i$ -ой бригады на  $j$ -й локомотив.

После заполнения матрицы расходов и решения задачи получают  $z$  пар локомотивов с бригадами  $L_j B_i$ , которые будем называть «локомотиво-бригадами». Также в конце первого этапа получаем моменты готовности локомотиво-бригад, то есть время окончания выполнения ТО-1. Следует отметить, что количество локомотиво-бригад соответствует количеству бригад  $z=n$ , если  $n < m$  (число бригад меньше, чем число локомотивов) или  $z=m$ , если  $n > m$  (бригад больше, чем локомотивов), то есть  $z = \min\{n, m\}$ .

Назначение локомотивов с бригадами к составам представляет собой более сложную задачу, чем назначение бригад на локомотивы, поскольку здесь существует большее количество критериев, которые влияют на конечный результат – наиболее рациональный план работы локомотивного парка. Известно, что есть определенные виды грузов, срок доставки которых должен быть минимальным, поэтому составы с такими грузами должны быть отправлены с наименьшей продолжительностью простоя на технических станциях. В локомотивных депо существует специализация бригад по плечам оборота, и существуют случаи, когда на момент готовности к отправлению состава определенного направления нет готовой к поездной работе локомотивной бригады для отправления на соответствующее направление.

Таким образом, на этапе назначения локомотиво-бригад к составам необходимо учесть не только продолжительность и стоимость простоя подвижного состава и бригад, а также такие критерии, как приоритет составов и соответствие направления отправления составов и плеч оборота бригад и т.п. Следует отметить, что для всех пар (локомотиво-бригад и составов) не существует общего правила или условий допустимости обслуживания локомотиво-бригадами составов, но такие условия можно сформулировать для каждой конкретной пары  $L_j B_i$  и  $S_u$ . Поэтому, на втором этапе решения задачи разработки плана работы локомотивного парка предлагается применять математический аппарат многокритериальной задачи о назначении [18], математическая постановка которой сводится к следующему.

На II-м этапе имеем  $z$  локомотиво-бригад  $L_j B_i$  и  $v$  составов грузовых поездов  $S_1, S_2, \dots, S_v$ . Расходы, возникающие при назначении локомотиво-бригады  $L_j B_i$  на состав  $S_u$  обозначим через  $c_{jiu}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ ,  $u = 1, \dots, v$ . Необходимо так распределить локомотиво-бригады по составам, чтобы минимизировать суммарные расходы, связанные с ожиданием локомотиво-бригад и составов:

$$C_2 = \sum_{j,i,u=1}^{n,m,v} c_{jiu} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Имеется также множество  $\mathbf{K} = \{K_1, K_2, \dots, K_a, \dots, K_d\}$  критериев характеристик локомотиво-бригад и составов. Часть критериев отражает требования локомотиво-бригад к составам, остальные – требования составов к локомотиво-бригадам.

Параметр соответствия  $R_{jii}(K_a)$  по критерию  $K_a$  характеризует разницу между требованиями локомотиво-бригады  $L_jB_i$  и возможностями состава  $S_u$ , или наоборот – разницу между требованиями состава  $S_u$  и возможностями локомотиво-бригады  $L_jB_i$ . Если по критерию  $K_a$  требования полностью совпадают с возможностями, то  $R_{jii}(K_a) = 0$ , в противном случае –  $R_{jii}(K_a) = 1$ . Для пары  $\{L_jB_i, S_u\}$  значения параметров соответствия по каждому критерию формируют вектор параметров соответствия  $R_{jii}$ .

Для формальной оценки качества назначения  $\{L_jB_i, S_u\}$  используется ранг  $G_{jii}$  – сумма отклонений по каждому компоненту вектора параметров соответствия:

$$G_{jii} = \sum_{a=1}^d R_{jii}(K_a) \quad (4)$$

Назначение  $\{L_jB_i, S_u\}$  считается идеальным, если  $G_{jii}=0$ ; качество назначения ухудшается с ростом значения  $G_{jii}$ . Идеальным решением многокритериальной задачи о назначениях является такое, при котором все пары назначений  $\{L_jB_i, S_u\}$  являются идеальными. Таким образом, целевая функция  $G$  многокритериальной задачи о назначениях имеет вид

$$G = \sum_{j,i,u=1}^{m,n,v} G_{jii} \rightarrow \min \quad (5)$$

В данной задаче, с помощью экспертных оценок было выделено 6 наиболее значимых критериев, влияющих на качество плана работы локомотивного парка:

- 1) соответствие направления отправления грузового поезда тяговому плечу локомотивной бригады;
- 2) наличие или отсутствие приоритета отправления  $u$ -го состава;
- 3) продолжительность простоя  $j$ -го локомотива от момента его готовности к проведению ТО-1 до момента отправления поезда со станции в случае назначения на  $u$ -й состав;
- 4) продолжительность простоя  $i$ -ой локомотивной бригады от момента ее готовности к выполнению ТО-1 до момента отправления поезда со станции в случае назначения на  $u$ -ый состав;
- 5) продолжительность простоя  $u$ -го состава от момента его готовности к прицепке локомотиво-бригады  $L_jB_i$  до момента отправления со станции;
- 6) стоимость простоя  $i$ -й бригады,  $j$ -го локомотива и  $u$ -го состава для назначения  $\{L_jB_i, S_u\}$ .

Таким образом, решение задачи разработки плана работы локомотивного парка на II-м этапе состоит из следующих шагов:

- составление матрицы простоя локомотивов, бригад и составов на основе пар локомотиво-бригад, полученных на первом этапе, для расчета параметров соответствия по критериям  $K_3, K_4, K_5$ ;
- составление матрицы стоимости простоя локомотивов, бригад и составов для расчета параметров соответствия по критерию  $K_6$ ;
- формирование таблицы векторов соответствия;
- формирование таблицы рангов назначений;
- решение таблицы рангов назначений с помощью Венгерского метода.

Матрица продолжительности простоя, размерностью  $z \times v$  формируется для пар  $\{L_jB_i, S_u\}$ , где каждая ячейка

содержит три значения: простой состава  $t_u^s$ , локомотива  $t_j^l$  и простой бригады  $t_i^b$ .

Матрица стоимости продолжительности простоя подвижного состава и локомотивных бригад, размерностью  $z \times v$  также формируется для пар  $\{L_jB_i, S_u\}$ , где каждая ячейка содержит суммарное  $c_{jii}$  значение стоимости простоя составов, локомотивов и бригад при соответствующем назначении:

$$c_{jii} = t_u^s \cdot r_s + t_j^l \cdot r_l + t_i^b \cdot r_b, \quad (6)$$

где  $r_s, r_l, r_b$  – удельные затраты на 1 час простоя на станции состава, локомотива и бригады соответственно.

Нужно отметить, что в результате решения задачи может быть получено несколько равнозначных планов. В каждом таком плане отсутствуют запрещенные перевозки, учитываются приоритеты отправления составов, обеспечивается периодичность выполнения технического обслуживания и ремонтов локомотивов, а также соблюдаются нормы продолжительности труда и отдыха локомотивных бригад. Окончательное решение по выбору плана работы локомотивного парка принимает оперативный диспетчерский персонал.

**Выводы** Предложенная методика разработки плана работы локомотивного парка позволяет учитывать не только количественные показатели (продолжительность и стоимость простоя подвижного состава и бригад), но и качественные показатели (соответствие направления отправления грузовых поездов плечам обслуживания локомотивных бригад; наличие приоритета отправления поездов). Определение оперативного плана работы локомотивного парка на основе многокритериальной задачи о назначениях позволяет учитывать множество факторов, влияющих на конечный результат. Данная система является динамической, так как при поступлении новых данных происходит перерасчет плана работы локомотивного парка с последующими рекомендациями об изменении подвязки локомотивов к составам грузовых поездов.

Выполненные эксперименты показали, что применение разработанной методики позволяет сократить затраты, связанные с простоем локомотивов, бригад и составов на 10...15%, по сравнению с существующей методикой работы диспетчерского персонала при оперативном планировании работы локомотивного парка.

#### Список литературы

1. Михайлюк В.Б., Кузнецов В.Г. Технология поездной работы центра управления перевозками Белорусской железной дороги // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2010. – №2(21). – С. 41-46.
2. Кузнецов В.Г., Войтехович И.А., Пильгун Т.В. Модель разработки заданий в суточном плане эксплуатационной работы Белорусской железной дороги // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2010. – №2(21). – С. 51-56.
3. Жуковицкий И.В., Устенко А.Б., Зіненко О.Л. Проблеми та перспективи автоматизації управління локомотивним господарством УЗ // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №2. – С. 38-42.
4. Некрашевич В.И., Моргунов А.И. Технология комплексного оперативного планирования работы

локомотивов грузового движения в условиях автоматизации // Вестник ВНИИЖТа. – 2005. – №3. – С. 20-25.

5. Некрашевич В.И. Технология комплексного оперативного планирования работы локомотивных бригад грузового движения в условиях автоматизации // Вестник ВНИИЖТа. – 2007. – №1. – С. 28-35.

6. Некрашевич В.И. Проблема адаптации графика движения грузовых поездов к колебаниям вагонопотоков // Вестник ВНИИЖТа. – 2006. – №4. С. 5-12.

7. Ковалев Н.В., Сальченко В.Л. Твердый график движения поездов – основа коренного улучшения организации работы локомотивных бригад // Вестник ВНИИЖТа. – 2008. – №1. – С. 38-42.

8. Жуковицкий І.В., Устенко А.Б., Зіненко О.Л. Створення нових можливостей АСК ВП УЗ із підтримки оперативного планування призначення локомотивів до складу вантажних поїздів // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – №5. – С. 51-56.

9. Козаченко Д.Н., Вернигора Р.В., Березовый Н.И. Проблемы использования частных локомотивов для выполнения перевозок на магистральном железнодорожном транспорте // 36. наук. праць ДНУЗТ: Серія “Транспортні системи і технології перевезень”, Вип. 3. – Д.: ДНУЗТ, 2012. – с. 40-46.

10. Правдин Н.В., Дыкандюк М.Л., Негрей В.Я. Прогнозирование грузовых потоков. М.: Транспорт, – 1987. – 247 с.

11. Єльнікова, Л.О. Дослідження тривалості руху вантажних поїздів між технічними станціями залізничного напрямку // 36. наук. праць ДНУЗТ: Серія “Транспортні системи і

технології перевезень”, Вип. 8. – Д.: ДНУЗТ, 2014. – С. 35-39.

12. Вернигора, Р. В., Єльнікова Л. О. Аналіз нерівномірності відправлення поїздів з технічних станцій на залізничному напрямку // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №3/3 (63). – С.63-66.

13. Sun, Y. A PSO-GRNN model for railway freight volume prediction [Електрон. ресурс] / Y.Sun, M. Lang, D. Wang, L. Liu // Journal of Industrial Engineering and Management. – 2014 – 7(2). – p. 413-433.

14. Лаврухин, А. В. Формирование интеллектуальной модели функционирования железнодорожной станции при выполнении поездной работы // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С.43-53.

15. Вернигора Р.В., Єльнікова Л.О. Дослідження ефективності використання нейронних мереж при прогнозуванні прибуття поїздів на технічні станції // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2015. – №3/3 (75). – С.23-27.

16. Вернигора Р.В., Пугач О.В. Дослідження процесів составоутворення на сортувальних станціях методами імітаційного моделювання // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2010. – №6/4. – С. 52-55.

17. Таха, Хэмди, А. Введение в исследование операций. 6-е издание– М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 912 с.

18. Никонов О.Я., Подоляка О.А., Подоляка А.Н., Скакалина Е.В. Математические методы решения многокритериальной задачи о назначениях // Вестник ХНАДУ. – 2011. - № 55. – с. 103-112.

## **R. Vernigora, L. Yelnikova PROBLEMS OF OPERATIONAL WORK PLANNING OF LOCOMOTIVE FLEET UKRAINE IN MODERN CONDITIONS AND ITS SOLUTIONS**

The paper presents a methodology of calculation of operational work plan of the locomotive fleet. The method is based on solving the problem of the multicriterial assignment that takes into account many factors that affect the efficiency of the operational work plan for locomotives and crews.