

УДК 656.0:629.4

Е. П. ГУРСКИЙ, А. А. МИХАЛЬЧЕНКО

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УСТРОЙСТВ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Приводятся результаты моделирования состояний транспортной системы с учетом воздействия вагонов и локомотивов на устройства пути, автоматику управления движением поездов и работы станционных устройств в зависимости от их конструктивных особенностей. По результатам исследований определены границы оптимальных параметров устойчивого функционирования устройств инфраструктуры.

Ключевые слова: транспортная система, модели развития, моделирование рисков, маневр ресурсами, безопасность перевозок, установившийся режим.

Развитие национальных транспортных систем является одним из приоритетов во всех странах мира. Поэтому формируются Государственные программы развития таких систем на периоды различной продолжительности, в которых предусматриваются мероприятия по модернизации инфраструктуры и транспортных средств, приобретению инновационных технологий, производственных линий, принципиально новых локомотивов и вагонов. Программы должны учитывать изменение состояния транспортных систем с течением времени, поэтому при их разработке требуется осуществлять моделирование функционирования технических элементов устройств инфраструктуры с целью анализа их устойчивости к изменению параметров системы.

Каждое мероприятие, включаемое в Государственную программу, проходит научную проработку с построением теоретической модели по следующим функциональным признакам:

– оптимальное развитие сети железных дорог с учетом усовершенствования транспортно-логистических систем регионов, которое предусматривает первоочередное инвестирование наиболее загруженных участков и пересмотр нормативов регламента по технической эксплуатации устройств транспортной инфраструктуры и транспортных средств [1];

– эффективное развитие транспортной системы с учетом внедрения инновационных технологий по организации перевозочного процесса с созданием современных и надёжных сетей связи, обеспечивающих стационарный и мобильный контроль состояния технических устройств пути, СЦБ, связи, энергоснабжения и безопасного движения транспортных средств [2];

– моделирование рисков технической эксплуатации железнодорожной инфраструктуры и транспортных средств при различных нагрузках на них с обеспечением безопасности перевозок грузов и пассажиров; поэтапный пе-

реход к динамическим нагрузкам транспортных средств на перегонные и станционные устройства пути и искусственных сооружений [3].

Ограничение маневра ресурсами на железнодорожном транспорте (трудовыми, технологическими и финансовыми) привело к необходимости использования моделирования синергетических систем и метода пропорций, математических методов для углублённого обоснования принимаемых решений [5]. Для оценки эффективности функционирования транспортной системы используется компьютерное моделирование, что позволяет выполнять инвестирование в развитие при ограниченных финансовых ресурсах [4].

При определении оптимального пути развития национальной сети железных дорог выполняется анализ устойчивости её функционирования с использованием методов синтеза аналитических сопоставлений состояний стационарных объектов железнодорожного транспорта и параметрической оценки воздействия мобильных объектов железнодорожного транспорта на элементы железнодорожной инфраструктуры. Такие исследования позволяют осуществлять инвестиции не во всю сеть, а только в ту её часть, для которой с учетом прогнозируемой нагрузки нарушается устойчивость функционирования.

К объектам транспортной инфраструктуры относятся устройства: пути и искусственных сооружений [П], интервального регулирования движения поездов и маневровой работы [Ш], энергоснабжения для обеспечения тяги поездов и жизнедеятельности производственно-технологических объектов железной дороги [Э], оперативного управления движением поездов и маневровой работой [Д], гражданских сооружений [НГШ].

При формировании инвестиционной части программ развития транспортного комплекса рассматриваются два варианта использования параметрических уравнений состояний стационарных объектов инфраструктуры:

1) без учёта воздействия мобильных объектов (транспортных средств) на технологические элементы железнодорожной инфраструктуры – рассматриваются моральный и физический износ от фактора времени для электрооборудования, зданий и сооружений, технических устройств управления перевозками (вычислительной техники, передаточных устройств, механизмов и др.);

2) с учётом воздействия мобильных объектов – анализируются действие локомотивов и вагонов на путь и искусственные сооружения, износ стрелочных переводов в зависимости от длины базы вагонов, пропускаемых через них, износ контактной сети, разрушение зданий и сооружений от воздействия колебаний земляного полотна при пропуске транспортных средств и др.

Метод синтеза аналитических сопоставлений состояний технических устройств железнодорожной инфраструктуры предполагает использование преобразования Лапласа [3]. При этом рассматривается уравнение, описывающее установившийся режим состояния объектов железнодорожной инфраструктуры по временному фактору

$$Z_m [(k_0 + 1)t_0] = S_m(t_0)Z_0(k_0 - t_0) + G_{np}(t_{np})\Omega_{np}[(k_1 + 1)t_0] + W_m(t_0)F_{np}(kt_{k+1}), \quad (1)$$

где k_0 – начальное (базовое) воздействие нагрузки на транспортную систему при исходном состоянии t_0 ; $S_m(t_0)$ – квадратичная матрица, описывающая функциональные границы устойчивости объектов,

$$S_m(t_0) = \sqrt{\sum_{i,j} |\Delta z_{ij}|^2}, \quad (2)$$

Δz_{ij} – изменение состояния технических устройств железнодорожной инфраструктуры для случаев без воздействия на них мобильной нагрузки и при его наличии; $Z_0(k_0 - t_0)$ – матрица установившегося режима состояния объектов инфраструктуры; $G_{np}(t_{np})$ – матрица переходных процессов объектов инфраструктуры при изменении их состояния, зависящих от предельных сроков эксплуатации t_{np} (износ без воздействия на технические элементы мобильных объектов),

$$G_{np}(t_{np}) = \|g_i\|_{(n \times m)}; \quad (3)$$

$\Omega_{np}[(k_1 + 1)t_0]$ – матрица коэффициентов, определяющих изменения в устойчивом функционировании устройств инфраструктуры при воздействии на них мобильной нагрузки или без него [7],

$$\Omega_{np}[(k_1 + 1)t_0] = k_{ty}(\omega_{np} - \omega_0) = k_{ty}\Delta\omega_{ty}, \quad (4)$$

k_{ty} – коэффициент, характеризующий свойства технических устройств, включённых в инфраструктуру; ω_{np} – предельное значение технологического воздействия на технические устройства; $W_m(t_0)$ – матрица технологических нагрузок на технические устройства инфраструктуры, которая моделируется с учетом ранее выполненных исследований [8],

$$W_m(t_0) = \begin{vmatrix} w_{1-1}(zt_1) & w_{1-2}(zt_2) & \dots & w_{1-k}(zt_k) \\ w_{2-1}(zt_1) & w_{2-2}(zt_2) & \dots & w_{2-k}(zt_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{m-1}(zt_1) & w_{m-2}(zt_m) & \dots & w_{m-k}(zt_k) \end{vmatrix}; \quad (5)$$

$F_{np}(kt_{k+1})$ – матрица, определяющая корректирующие действия по стабилизации работы технических устройств инфраструктуры,

$$F_{np}(t_0) = \begin{vmatrix} f_0 & 0 & \dots & 0 \\ f_1 & f_0 & \dots & 0 \\ f_2 & f_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{(k-1)} & f_{(k-2)} & \dots & 0 \end{vmatrix}_{(k \times k)}; \quad (6)$$

f_0, f_1, \dots, f_{k-1} – определяются из полинома [8, 11]

$$\beta(kt_{np})_m = f_0 + f_1(kt_{np})_m + f_2(kt_{np})_m^2 + \dots + f_m(kt_{np})_m^n. \quad (7)$$

Отметим, что в зоне радиоактивного заражения действуют дополнительные факторы, влияющие на корректировку принимаемых решений [6].

По результатам исследований, проведенных при подготовке Государственной программы развития транспортного комплекса, получены полиномы, отражающие устойчивость работы технических устройств инфраструктуры в зависимости от установленных (нормативных) сроков их эксплуатации. Как оказалось, процент отказа различных устройств описывается выражениями:

– пути (П):

$$\beta_{п}(k t_{np})_{п} = [1,446 + 2,671(k t_{np})_{п} + 0,964(k t_{np})_{п}^2] / 100; \quad (8)$$

– сигнализации и связи (Ш):

$$\beta_{ш}(k t_{np})_{ш} = [1,446 + 2,671(k t_{np})_{ш} + 0,964(k t_{np})_{ш}^2 + 0,062(k t_{np})_{ш}^3] / 100; \quad (9)$$

– электроснабжения (Э):

$$\beta_{э}(k t_{np})_{э} = (1,16 + 2,743(k t_{np})_{э} + 0,526(k t_{np})_{э}^3 + 0,0042(k t_{np})_{э}^3) / 100; \quad (10)$$

– зданий и сооружений, включаемых в железнодорожную инфраструктуру (НГШ):

$$\beta_{нгш}(k t_{np})_{нгш} = 1,03 + 1,841(k t_{np})_{нгш} + 0,826(k t_{np})_{нгш}^2 + 0,0011(k t_{np})_{нгш}^3 / 100. \quad (11)$$

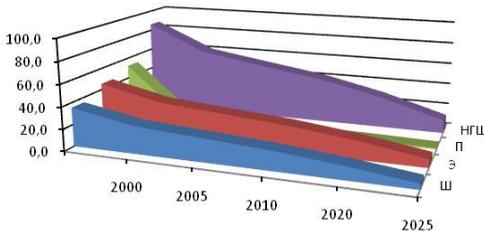


Рисунок 1 – Устойчивость работы инфраструктуры без учета воздействия мобильных нагрузок на её технические элементы, в процентах

наряду с оценкой стабильности работы технических устройств по временному фактору рассматривается предельный режим технологического воздействия транспортных средств на них. При этом используются показатели состояния (z_k): для устройств пути, искусственных сооружений и электроснабжения – тонно-километры брутто; устройств СЦБ, зданий и сооружений – вагоно-километры. Предельный режим работоспособности технических устройств при воздействии на них мобильных нагрузок X_m и затрат финансовых ресурсов C_m определяется интегралом корректировки [9]

$$R_m(z_k) = e^{\int_0^{t_{np}} B_m dt} + Z_m(t_1) + \int_{t_1}^{t_{np}} e^{-\int_{t_0}^{t_{np}} B_m dv} (W_m \Omega_m + C_m F_m) dt + e^{\int_{t_0}^{t_{np}} X_m dt}. \quad (12)$$

С учетом корректирующих свойств при технологическом воздействии на устройства инфраструктуры ранее вычисленных параметров β , w_m , ω_m и диаметре инфраструктурного элемента d [10]

$$B_m(z_k) = \beta_1 \frac{w_m \omega_m}{d \cdot t^2} + \beta_2 \frac{w_m^2 \omega_m}{d \cdot t^2} + \omega_m; \quad (13)$$

или

$$B_m(z_k) = \beta_0 (T_1^2 \frac{w_m^2 \omega_m}{dt^2} + 2T_1 \varepsilon_1 \frac{w_m \omega_m}{dt^2} + \omega_m); \quad (14)$$

моделируются дополнительные воздействия на устройства инфраструктуры:

– пути и искусственные сооружения (П)

$$\beta_{\text{п}}(z_{\text{п}}) = (1,116 + 1,891z_{\text{п}} + 0,846z_{\text{п}}^2) / 1000; \quad (15)$$

– сигнализации и связи (Ш)

$$\beta_{\text{ш}}(z_{\text{ш}}) = (1,121 + 0,612z_{\text{ш}} + 0,459z_{\text{ш}}^2 + 0,0629z_{\text{ш}}^3) / 100; \quad (16)$$

– электроснабжения (Э) с учетом ранее выполненных исследований [7]

$$\beta_{\text{э}}(z_{\text{э}}) = (1,016 + 2,793z_{\text{э}} + 0,542z_{\text{э}}^2 + 0,00413z_{\text{э}}^3) / 100; \quad (17)$$

– гражданских сооружений, включаемых в железнодорожную инфраструктуру (НГШ),

$$\beta_{\text{нгш}}(z_{\text{нгш}}) = 1,34 + 1,941z_{\text{нгш}} + 0,826z_{\text{нгш}}^2 + 0,0012z_{\text{нгш}}^3) / 100. \quad (18)$$

По результатам полученных полиномов для технических устройств отраслевых хозяйств железной дороги построены диаграммы ретроспективного и перспективного их состояния с учетом воздействия на них мобильной нагрузки, которые приведены на рисунке 2.

Из рисунков 1 и 2 видно, что при отсутствии модернизации или замены элементов технических устройств, прогнозируется нарушение устойчивости их функционирования по прогрессивной зависимости, описываемой полиномами (15) и (17) в соответствии с (1). С учетом полученных зависимостей в дальнейшем выбираются объекты инфраструктуры, требующие инвестиций.

Заключение. Полученные результаты использованы при формировании Государственных программ развития транспортного комплекса Республики Беларусь. Выполненное финансирование намеченных в программах мероприятий позволило сделать работу технических устройств инфраструктуры железнодорожного транспорта более устойчивой и определить технические

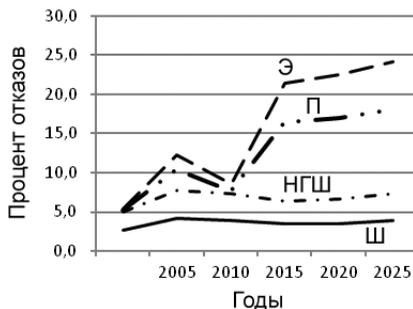


Рисунок 2 – Зависимости устойчивости работы инфраструктуры с учетом воздействия мобильных нагрузок на её технические элементы

элементы транспортной инфраструктуры, функционирование которых в прогнозном периоде будет менее устойчивым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Моделирование оптимальной сети железных дорог с учётом развития транспортно-логистической системы региона / М. Б. Петров [и др.] // Экономика региона. – 2013. – № 4. – С. 181–188.

2 **Боев, В. Н.** Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В. Н. Боев. – СПб. : ВHV, 2012. – 368 с.

3 **Емельянов, С. В.** Системы управления и моделирование. Динамические системы. Управление рисками и безопасностью / С. В. Емельянов. – М. : Красанд, 2014. – 124 с.

4 **Сирота, А. А.** Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем / А. А. Сирота. – М. : Техносфера, 2006. – 280 с.

5 **Шаповалов, В. И.** Моделирование синергетических систем. Метод пропорций и другие математические методы / В. И. Шаповалов. – М. : Проспект, 2016. – 136 с.

6 Радиационная обстановка на участке автодороги Н-08, проходящей вблизи хранилища отходов уранового производства / А. С. Беликов [и др.] // Технології та інфраструктура транспорту : Міжнародна науково-технічна конференція : Тези доповідей. – Харьков : УкрДУЗТ, 2018. – С. 65–67.

7 **Кулинич, Ю. М.** Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями / Ю. М. Кулинич, А. Н. Савоськин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2005. – № 1. – С. 163–169.

8 Развитие и реконструкция социально-транспортной инфраструктуры мегаполиса. Надземные автомагистрали над железной дорогой / Ю. В. Алексеев [и др.]. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – 328 с.

9 Обнаружение «скачков» параметров экономических процессов / А. В. Полярус [и др.] // Технології та інфраструктура транспорту : Міжнародна науково-технічна конференція : Тези доповідей. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. – С. 423–425.

10 **Clarke, D.** The application of maneuvering criteria in hull design using linear theory / D. Clarke, P. Gedling, G. Hine // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. – 1983. – Vol. 125. – P. 45–68.

11 **Доенин, В. В.** Моделирование транспортных процессов и систем / В. В. Доенин. – М. : Спутник+, 2012. – 288 с.

E. P. GURSKIY, A. A. MIKHALCHENKA

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

MODELING OF THE OPERATION OF THE TRANSPORT SYSTEM ELEMENTS CONSIDERING THE TECHNICAL CONDITION CHANGE OF INFRASTRUCTURE DEVICES

There are presented the transport system modeling results, taking into account the effect of cars and locomotives on track devices, automatic control of train traffic and station equipment operation depending on their design features. Based on the research results, the boundaries of the optimal parameters for the infrastructure devices stable functioning were determined.

Получено 30.05.2018