



Банищикова Анна Анатольевна,
ст. преподаватель кафедры «Управление процессами перевозок»,
Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС,
тел. 89144709415, e-mail: annabanshchikova@bk.ru

Базилевский Михаил Павлович,
к. т. н., доцент кафедры «Математика»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(3952)638157, e-mail: mik2178@yandex.ru

Тихомиров Владимир Александрович,
к. т. н., доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(3952)638345, e-mail: tikhomirov_va@irgups.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМА ПРОПУСКА ПЕРЕВОЗИМЫХ НА НЕТЯГОВОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ КРУПНОТОННАЖНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ В ЭКСПОРТНО-ИМПОРТНОМ СООБЩЕНИИ В НАПРАВЛЕНИИ РФ – КНР

A. A. Banshchikova, M. P. Bazilevsky, V. A. Tikhomirov

THE FORECASTING OF PASS VOLUME OF LARGE CONTAINERS CARRIED ON NON- TRACTIVE ROLLING STOCK IN THE EXPORT-IMPORT COMMUNICATION IN TOWARDS FROM RUSSIAN FEDERATION TO CHINA

Аннотация. Настоящая статья посвящена прогнозированию объема пропуска крупнотоннажных контейнеров в экспортно-импортном сообщении на железнодорожном пункте пропуска Забайкальск – Маньчжурия в период 2016–2025 гг. Данный пункт пропуска обеспечивает до 70 % всего внешнеторгового грузопотока в сухопутном сообщении между КНР и РФ. Выявлено, что динамика объема, структура внешнеторгового грузопотока в экспортно-импортном сообщении характеризует уровень торгово-экономического взаимодействия сопредельных государств. Определено, что в последние 15 лет перевозки грузов в крупнотоннажных контейнерах как в импортном, транзитном, так и в экспортном российско-китайском направлении имеет тенденцию стабильного роста. Прогноз объема следования крупнотоннажных контейнеров на железнодорожном пункте пропуска Забайкальск – Маньчжурия выполнен с использованием инструментов регрессионного анализа. На основании трендовых моделей разработаны точечный и интервальный прогнозы. Построены многофакторные регрессионные модели объема пропуска импортных и экспортных крупнотоннажных контейнеров. Выявлено, что среди группы из 20 факторов, оказывающих влияние на объем пропуска крупнотоннажных контейнеров, наиболее значимыми являются: инвестиции в основной капитал РФ, объем импорта КНР, грузооборот железнодорожного транспорта КНР. На основании многофакторных моделей разработан прогноз по позитивному и негативному сценариям. Определено, что на конец прогнозного периода (2025 г.) объем импорта и экспорта крупнотоннажных контейнеров по позитивному и негативному сценариям отличаются в среднем в три раза.

Ключевые слова: регрессионная модель, тренд, крупнотоннажный контейнер, железнодорожный пункт пропуска, экспорт, импорт, прогнозирование.

Abstract. This article is devoted to the prediction of the volume of pass of heavy tonnage containers in the export-import traffic on railway checkpoint Zabaikalsk – Manzhouli during 2016–2025. This checkpoint provides a pass of up to 70 % of the total foreign trade freight in land communication between the PRC and the Russian Federation. It was revealed, that the dynamics of volume, the structure of foreign trade cargo in export-import communication characterizes the level of trade and economic interaction of neighboring countries. It is determined that in the last 15 years the transportation of goods in large-capacity containers both in the import, transit, and export Russian-Chinese direction has a tendency of stable growth. Forecast of the volume of large-capacity containers at the Zabaikalsk-Manchuria railway checkpoint is made, using regression analysis tools. Based on the models of trend are designed point and interval forecasts. Multifactorial regression models of the volume of admission of import and export large-tonnage containers have been constructed. It is revealed, that among the group of 20 factors that affect the volume of large-capacity container passes, the most significant are: investment in the fixed capital of the Russian Federation, the volume of imports of the PRC, freight turnover of the Chinese railway transport. Based on multivariate models forecast on the positive and negative scenarios is developed. It is determined that at the end of the forecast period (2025), the volume of import and export of large-capacity containers in the positive and negative scenarios differ by an average of three times.

Keywords: regression model, trend, heavy tonnage container, railway checkpoint, export, import, forecasting.

Введение

Торгово-экономическое сотрудничество России и Китая происходит с участием работы пунктов пропуска через государственную границу. Всего на российско-китайской государственной границе находятся 25 пунктов пропуска, которые расположены в Дальневосточном и Сибирском федеральных округах.

Около 70 % всего внешнеторгового грузопотока между КНР и РФ в сухопутном сообщении обеспечивает многосторонний грузопассажирский железнодорожный пункт пропуска (ЖДПП) Забайкальск – Маньчжурия, который расположен на железнодорожной грузовой межгосударственной передаточной станции Забайкальск.

Объемы внешнеторговых грузов, предъявляемых грузоотправителями к перевозке, колеблются



ся в значительных пределах. На точность прогноза существенное влияние оказывает нелинейный характер зависимости функции от целого ряда факторов. К такого рода группам могут быть отнесены: технико-технологические факторы; производственные факторы; сырьевые факторы; политические факторы; баланс торговых отношений; конъюнктура мирового рынка. Характер влияния факторов этих групп существенно различается. Так, например, влияние политических факторов и конъюнктуры мирового рынка носит дискретный характер, т. е. при изменении этих параметров происходит нелинейное изменение объемов перевозок внешнеторговых грузов.

Построение прогнозной модели, учитывающей влияние всех групп факторов, очень сложно, требует длительного сбора информации из большого количества независимых источников [1, 2].

Поэтому прогноз в данных условиях состоит в определении некоторой периодичности смены характера двусторонних торгово-экономических отношений РФ и КНР с учетом влияния мировой политики и экономики, нахождения оценок, позволяющих выявить допустимые границы, тенденции развития процесса.

Цель работы – прогнозирование объема пропуска крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия в экспортно-импортном сообщении в направлении РФ – КНР на десятилетний период с 2016 по 2025 г.

Исходные данные

Построение математических моделей объема пропуска крупнотоннажных контейнеров в экспортно-импортном сообщении на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия произведено на основании анализа статистических данных торгово-экономических показателей РФ и КНР в период с 1990 по 2015 гг. [3–5].

Входные переменные по РФ:

- x_1 – ВВП РФ по ППС, млрд долл.;
- x_2 – инвестиции в основной капитал РФ, млрд руб.;
- x_3 – инвестиции в транспорт РФ, млрд руб.;
- x_4 – оборот розничной торговли в РФ, млрд руб.;
- x_5 – оборот отгруженной продукции в РФ, млрд руб.;
- x_6 – объем экспорта РФ, млрд долл.;
- x_7 – объем импорта РФ, млрд долл.;
- x_8 – внешнеторговый оборот России со странами дальнего зарубежья (экспорт), млрд долл.;

x_9 – внешнеторговый оборот России со странами дальнего зарубежья (импорт), млрд долл.;

x_{10} – внешнеторговый оборот России со странами-членами Евросоюза (экспорт), млрд долл.;

x_{11} – внешнеторговый оборот России со странами-членами Евросоюза (импорт), млрд долл.;

x_{12} – внешнеторговый оборот России со странами АТЭС (экспорт), млрд долл.;

x_{13} – внешнеторговый оборот России со странами АТЭС (импорт), млрд долл.;

x_{14} – грузооборот транспорта РФ, млрд ткм;

x_{15} – грузооборот железнодорожного транспорта РФ, млрд т-км.

Входные переменные по КНР:

- z_1 – ВВП КНР по ППС, млрд долл.;
- z_2 – объем импорта КНР, млрд долл.;
- z_3 – объем экспорта КНР, млрд долл.;
- z_4 – грузооборот транспорта КНР, млрд ткм;
- z_5 – грузооборот железнодорожного транспорта, млрд ткм.

Выходными переменными математических моделей являются:

- y_1 – объем импорта крупнотоннажных контейнеров, ДФЭ;
- y_2 – объем экспорта крупнотоннажных контейнеров, ДФЭ.

Трендовые модели

Тренды, представляющие собой простейшие регрессионные модели, зачастую оказываются весьма эффективными при решении задач прогнозирования [6–9]. По графикам временных рядов y_1 и y_2 выявлена ярко выраженная тенденция к росту, поэтому для каждой выходной переменной построен линейный тренд.

Для оценки качества регрессионных моделей использованы:

- 1) критерий детерминации R^2 , значение которого чем ближе к 1, тем выше качество регрессии;
- 2) критерий Дарбина–Уотсона DW , значение которого чем ближе к 2, тем слабее эффект автокорреляции остатков;
- 3) t -статистики для определения значимости коэффициентов регрессии.

Линейный тренд объема импорта крупнотоннажных контейнеров имеет вид:

$$y_1 = -6659,42 + 2074,24t, \quad (1)$$

(–1,849) (8,895)



где t – переменная времени ($t=1$ в 1990 г.). Под коэффициентами модели указаны t -статистики.

Качество модели (1): критерий детерминации $R^2 = 0,767$, критерий Дарбина–Уотсона $DW = 1,129$, оба коэффициента значимы для уровня значимости 0,1. Вывод: качество модели (1) удовлетворительное.

На рис. 1 представлена динамика объема импорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия, точечный и интервальный прогнозы на 2016–2025 гг. с надежностью 0,95. В табл. 1 приведены соответствующие прогнозные значения y_1 , ДФЭ.



Рис. 1. Точечный и интервальный прогноз по модели (1)

Таблица 1
Прогнозные значения на 2016–2025 гг. по модели (1)

| Год | Объем импорта крупнотоннажных контейнеров (y_1 , ДФЭ) | | |
|------|--|---------------------------------------|--|
| | Точечный прогноз | Интервальный прогноз (нижняя граница) | Интервальный прогноз (верхняя граница) |
| 2016 | 49345 | 29496 | 69194 |
| 2017 | 51419 | 31407 | 71431 |
| 2018 | 53494 | 33309 | 73678 |
| 2019 | 55568 | 35200 | 75935 |
| 2020 | 57642 | 37082 | 78202 |
| 2021 | 59716 | 38955 | 80478 |
| 2022 | 61790 | 40818 | 82763 |
| 2023 | 63865 | 42672 | 85057 |
| 2024 | 65939 | 44518 | 87360 |
| 2025 | 68013 | 46356 | 89670 |

Линейный тренд объема экспорта крупнотоннажных контейнеров:

$$y_2 = -3169,37 + 1006,36t, \quad (2)$$

(-1,756) (8,612)

где t – переменная времени.

Качество модели (2): критерий детерминации $R^2 = 0,756$, критерий Дарбина–Уотсона $DW = 1,687$, оба коэффициента значимы для уровня значимости 0,1. Вывод: качество регрессии (2) удовлетворительное.

На рис. 2 представлены динамика объема экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия, точечный и интервальный прогнозы с надежностью 0,95 на 2016 – 2025 гг., а в табл. 2 приведены соответствующие прогнозные значения y_2 , ДФЭ.



Рис. 2. Точечный и интервальный прогнозы по модели (2)

Таблица 2
Прогнозные значения на 2016–2025 гг. по модели (2)

| Год | Объем экспорта крупнотоннажных контейнеров (y_2 , ДФЭ) | | |
|------|---|---------------------------------------|--|
| | Точечный прогноз | Интервальный прогноз (нижняя граница) | Интервальный прогноз (верхняя граница) |
| 2016 | 24002 | 14056 | 33949 |
| 2017 | 25009 | 14980 | 35037 |
| 2018 | 26015 | 15900 | 36130 |
| 2019 | 27021 | 16815 | 37228 |
| 2020 | 28028 | 17725 | 38330 |
| 2021 | 29034 | 18630 | 39438 |
| 2022 | 30040 | 19531 | 40550 |
| 2023 | 31047 | 20427 | 41666 |
| 2024 | 32053 | 21319 | 42787 |
| 2025 | 33059 | 22207 | 43912 |

Построенные трендовые модели позволяют сделать вывод, что с 2016 по 2025 г. на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия рост объема импорта крупнотоннажных контейнеров будет происходить в среднем на 2074 ДФЭ в год, а рост объема экспорта – на 1006 ДФЭ в год. Практическую значимость трендовых моделей снижает тот факт, что в них строится зависимость выходных переменных только от времени. Существенно больший научный интерес при решении задач прогнозирования



представляет построение факторных регрессионных моделей, по которым возможно создание так называемых прогнозных сценариев.

Факторные модели

Для отбора из всех входных переменных небольшой группы факторов, которые вносят наибольший вклад в вариацию зависимой переменной, был применен метод исключения [10–13]. Для этого сначала строится уравнение регрессии со всеми входными переменными. Затем по очереди исключаются из уравнения факторы с минимальными по абсолютной величине значениями t -статистик. Процедура осуществляется до тех пор, пока все оставшиеся в уравнении факторы не станут значимы для заданного уровня значимости. В работе уровень значимости составляет 5 %.

Многофакторная модель объема импорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия:

$$y_1 = -28636,1 + 14,910x_1 + 7,468x_2 - 7,330x_4 + 33,738z_2 + 15,508z_5. \quad (3)$$

Качество модели (3): критерий детерминации $R^2 = 0,954$, критерий Дарбина–Уотсона $DW = 1,966$. Вывод: качество модели высокое.



Рис. 3. Графики фактических и расчетных значений по модели (3)

Высокое качество модели (3) также демонстрируют графики фактических и расчетных значений переменной y_1 , представленные на рис. 3.

Многофакторная модель объема экспорта контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия:

$$y_2 = 18818,8 + 8,807x_2 + 23,431z_2 - 60,913z_3 - 3,466x_{15} - 5,972z_5. \quad (4)$$

Качество модели (4): критерий детерминации $R^2 = 0,938$, критерий Дарбина–Уотсона $DW = 2,190$. Вывод: качество модели хорошее.

Графики фактических и расчетных значений переменной y_2 представлены на рис. 4.



Рис. 4. Графики фактических и расчетных значений по модели (4)

Следует отметить, что в моделях (3) и (4) выявлен эффект мультиколлинеарности, который лишает смысла интерпретацию коэффициентов модели регрессии. Однако целью данного исследования является в первую очередь прогнозирование, поэтому с мультиколлинеарностью можно и не бороться.

Путем сравнения уравнения (3) и (4) установлено, что объемы импорта крупнотоннажных контейнеров (y_1 , ДФЭ), а также объем экспорта крупнотоннажных контейнеров (y_2 , ДФЭ) в наибольшей степени зависят от инвестиций в основной капитал РФ x_2 (млрд руб.), импорта КНР z_2 (млрд долл.) и грузооборота железнодорожного транспорта КНР z_5 (млрд ткм).

Прогнозные сценарии

Модели (3) и (4) использованы для получения прогнозов на 2016–2025 гг. по позитивному и негативному сценариям. Первый основывается на предположении, что события торгово-экономического взаимодействия, экономического развития РФ и КНР будут развиваться наилучшим образом, второй – наихудшим.

Для получения неизвестных значений входных факторов на период 2016–2025 гг. из исходной выборки данных были исключены наблюдения с 1990 по 2005 г., поскольку они не в полной мере характеризуют современные тенденции развития экономик России и Китая. По оставшимся наблюдениям с 2006 по 2015 г. были построены следующие линейные тренды:

$$x_1 = -1011,65 + 163,83t, \quad (5)$$

$$x_2 = -12878,4 + 1077,54t, \quad (6)$$

$$x_4 = -22985,8 + 1900,09t, \quad (7)$$

$$x_{15} = 1305,29 + 37,822t, \quad (8)$$



$$z_2 = -2907,29 + 204,814t, \quad (9)$$

$$z_3 = -2086,71 + 173,262t, \quad (10)$$

$$z_5 = 64,257 + 127,071t. \quad (11)$$

Качество моделей (5)–(11) оказалось весьма высоким.

1. Позитивный сценарий.

Для позитивного сценария по трендам (5)–(11) получены прогнозные значения на 2016–2025 гг., которые затем были использованы для получения прогнозов по моделям (3) и (4). Результаты представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3
Прогнозные значения на 2016–2025 гг.
(позитивный сценарий)

| Год | y_1 , ДФЭ | y_2 , ДФЭ |
|------|-------------|-------------|
| 2016 | 53559 | 27001 |
| 2017 | 59002 | 29847 |
| 2018 | 64445 | 32691 |
| 2019 | 69888 | 35537 |
| 2020 | 75330 | 38381 |
| 2021 | 80773 | 41226 |
| 2022 | 86216 | 44072 |
| 2023 | 91658 | 46916 |
| 2024 | 97102 | 49762 |
| 2025 | 102544 | 52607 |



Рис. 5. Динамика объема импорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия



Рис. 6. Динамика объема экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия

Графики динамики объема импорта и экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия в случае позитивного сценария представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

2. Негативный сценарий.

Для получения негативного сценария в трендах (5)–(11) знаки угловых коэффициентов были изменены с «плюса» на «минус». Аналогично по трендам найдены прогнозные значения входных переменных, по которым затем получен прогноз объема импорта и экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия. Результаты прогнозирования приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4
Прогнозные значения на 2016–2025 гг.
(негативный сценарий)

| Год | y_1 , ДФЭ | y_2 , ДФЭ |
|------|-------------|-------------|
| 2016 | 46129 | 23711 |
| 2017 | 44141 | 23265 |
| 2018 | 42154 | 22820 |
| 2019 | 40165 | 22374 |
| 2020 | 38178 | 21929 |
| 2021 | 36190 | 21484 |
| 2022 | 34202 | 21038 |
| 2023 | 32215 | 20592 |
| 2024 | 30227 | 20146 |
| 2025 | 28239 | 19701 |

Графики динамики объема импорта и экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия в случае негативного сценария приведены на рис. 7 и 8.



Рис. 7. Динамика объема импорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия



Рис. 8. Динамика объема экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия

Заключение

Построены трендовые модели объема импорта и экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия, по которым получен точечный и интервальный прогноз на период 2016–2025 гг.

Построены многофакторные регрессионные модели объема импорта и экспорта крупнотоннажных контейнеров на ЖДПП Забайкальск – Маньчжурия. Выявлено, что оба показателя зависят в наибольшей степени от инвестиций в основной капитал РФ, объема импорта КНР и грузооборота железнодорожного транспорта КНР.

Многофакторные модели использованы для построения позитивного и негативного прогнозных сценариев. Определено, что на конец прогнозного периода (2025 г.) объем импорта и экспорта крупнотоннажных контейнеров по позитивному и негативному сценариям отличается в среднем в три раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Научные исследования в сфере международных железнодорожных перевозок: оценка сдерживающих факторов и перспектив развития пограничной инфраструктуры на железнодорожных пунктах пропуска и разработка оптимальной схемы расположения транспортно-логистических центров : отчет о НИР. № 103-02.02-3. 17.11.2008.
2. Коновалова М.И., Банщикова А.А. Разработка прогнозной модели следования внешнеторговых грузов в большегрузных контейнерах через пограничный переход Забайкальск – Маньчжурия // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Шестой междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию со дня образования Иркут. гос. ун-та путей сообщ. Т. 2. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2015. С. 291–296.
3. Протокол совещания представителей железных дорог и внешнеторговых организаций Социалистической Республики Вьетнам, Республики Казахстан, Китайской Народной Республики, Корейской Народно-Демократической Республики, Монголии и Российской Федерации по согласованию объемов перевозок экспортных, импортных и транзитных грузов железнодорожным транспортом и мероприятия для их обеспечения, 1990-2015 гг.
4. Отчетные данные Международной службы Забайкальской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» о выполнении плана перевозок внешнеторговых грузов через пограничную станцию Забайкальск, 1990-2015 гг.
5. Банщикова А.А. Анализ динамики и структуры международного грузопотока транспортной системы Забайкальского края // Транспортно-логистическая интеграция Забайкальского края в условиях российско-китайско-монгольского трансграничья : материалы междунар. науч.-практ. конф. Иркутск : Изд-во БГУ, 2016. С. 3–12.
6. Базилевский М.П., Врублевский И.П., Носков С.И., Яковчук И.С. Среднесрочное прогнозирование эксплуатационных показателей функционирования Красноярской железной дороги // Фундаментальные исследования. 2016. № 10 (3). С. 471–476.
7. Базилевский М.П., Гефан Г.Д. Проблема автокорреляции остатков регрессии на примере моделирования грузооборота железнодорожного транспорта по данным временных рядов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 141–147.
8. Базилевский М.П., Гефан Г.Д. Об учёте эффектов автокорреляции во временных рядах // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2015. № 14. С. 11–22.
9. Базилевский М.П., Носков С.И. Технология организации конкурса регрессионных моделей // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2009. №7. С. 77–84.
10. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: исследование зависимостей. М. : Финансы и статистика. 1985. 487 с.
11. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М. : ЮНИТИ. 1998. 1022 с.
12. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Диалектика. 2007. 912 с.
13. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессия. М. : Финансы и статистика. 1981. 304 с.



УДК 629.4.014.3

Могила Владимир Степанович,
к. т. н., доцент кафедры «Локомотивы»,
Белорусский государственный университет транспорта,
тел.: +375(232)952941

Ананьева Оксана Сергеевна,
старший преподаватель кафедры «Локомотивы»,
Белорусский государственный университет транспорта,
тел.: +375(232) 952941, e-mail: maroxis@mail.ru

Загорцев Вадим Александрович,
старший преподаватель кафедры «Локомотивы»,
Белорусский государственный университет транспорта,
тел.: +375 44 726 10 36, e-mail: vatis@tut.by

Подольская Валерия Николаевна,
аспирант кафедры «Локомотивы»,
Белорусский государственный университет транспорта,
тел.: +375(232) 952941, e-mail: podolskajavalera@yandex.by

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

V. S. Mogila, O. S. Ananyeva, V. A. Zagortsev, V. N. Podolskaya

SIMULATION MODEL OF JOINT OPERATION OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM AND ELECTRIC ROLLING STOCK

Аннотация. Представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных сотрудниками кафедры «Локомотивы» Белорусского государственного университета транспорта, анализ которых показал, что влияние уровня напряжения в тяговой сети является существенным и, следовательно, должно учитываться при разработке методик расчета систем тягового электроснабжения. Разработана методика построения имитационной модели совместной работы тягового подвижного состава и системы тягового электроснабжения. Особое внимание при разработке модели уделено влиянию случайного характера числа поездов и времени появления их в зоне питания, а также уровню напряжения на токоприемниках электрического подвижного состава, что в дальнейшем позволило скорректировать тяговые и скоростные характеристики этого вида транспорта. Определено влияние подвижного состава на режимы работы тяговой сети и предложен алгоритм учета этого влияния, который реализован в виде имитационной модели. Верификация полученной модели показала, что полученная методика и модель могут быть использованы для определения токовых нагрузок, параметров защиты, а также для подбора оборудования систем тягового электроснабжения при совместной работе с электрическим подвижным составом.

В статье приведены результаты расчетов влияния уровня напряжения в контактной сети на режимы работы электрического подвижного состава. Рассчитаны эффективные токи в системе тягового электроснабжения на примере Минского метрополитена, а также коэффициенты перегрузки отдельных преобразовательных агрегатов на расчетных тяговых подстанциях.

Ключевые слова: имитационная модель, электрический подвижной состав, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция.

Abstract. The results of computational experiments conducted by the staff of the Lokomotive department of the Belarusian state university of transport are presented, the analysis of these experiments showed that the influence of the voltage level in the traction network is significant and, therefore, should be taken into account when developing methods for calculating the traction power supply systems. A technique for constructing an imitation model for the joint operation of a tractive rolling stock and traction power supply system was developed. Particular attention in the development of the model is given to the influence of the random character of the number of trains and the time of their appearance in the feeding zone, as well as the voltage level at the current collectors of electric rolling stock, which subsequently allowed to correct the traction and speed characteristics of this mode of transport. The influence of the rolling stock on the operation modes of the traction network is determined and an algorithm for accounting for this influence is proposed, which is implemented in the form of an imitation model. Verification of the obtained model showed that the obtained method and model can be used to determine current loads, protection parameters, and also to select equipment of traction power systems when working together with electric rolling stock.

The article presents the results of calculations of the influence of the voltage level in the contact network on the operating modes of electric rolling stock. The effective currents in the traction power supply system are calculated on the example of the Minsk metro, as well as the coefficients of overloading of individual converter units at the computed traction substations.

Keywords: Simulation model, electric rolling stock, traction power supply system, traction substation.

В настоящее время производится строительство новых и модернизация уже существующих участков Минского метрополитена, а также электрификация отдельных участков Белорусской железной дороги. При этом возникает ряд вопросов, решение которых позволит избежать необосно-

ванных затрат и добиться рациональных режимов эксплуатации электрического подвижного состава (ЭПС). При этом возникает необходимость в определении нагрузочной способности системы тягового электроснабжения (СТЭ). Решение таких задач, как правило, осуществляется на основе ме-