

*И. А. Баринов*<sup>1</sup>, *В. С. Иванов*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

## **ИНТЕРВАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ**

*Аннотация.* В данной работе представлены результаты интервального прогнозирования удельного расхода электроэнергии на тягу поездов ОАО «РЖД». В рамках исследования проведён предварительный сбор данных статистики удельного расхода электроэнергии за прошедшие десять лет. Построена математическая модель на основе полиномиальной линии тренда второго порядка, рассчитаны среднее квадратическое отклонение и ошибки аппроксимации. По результатам расчётов и построений составлены прогнозы пессимистического, консервативного и оптимистического сценариев динамики снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов на железных дорогах России.

*Ключевые слова:* энергоэффективность, расход электроэнергии, тяга поездов, интервальное прогнозирование, сценарии развития.

*Igor A. Barinov*<sup>1</sup>, *Vladislav S. Ivanov*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russian Federation

## **INTERVAL PREDICTION OF TRAIN TRACTION ELECTRICAL ENERGY RATE DYNAMICS FOR ENERGY REGENERATION DEVELOPMENT**

*Abstract.* The article presents results of train traction electrical energy rate interval prediction for Russian railway transport. The research is based on preliminary data collection on energy consumption statistics for the preceding ten years, courtesy of JSCo RZD. Using polynomial line trend method, root mean square deviation and error approximations are calculated. The final calculations are used to present pessimistic, conservative and optimistic scenarios of future train traction energy rate reduction on Russian railways.

*Keywords:* energy efficiency, electrical energy consumption, train traction, interval prediction, scenario development.

### **Введение**

Одна из основных тенденций развития современной российской экономики – неуклонно растущая потребность в энергоресурсах. Для её удовлетворения помимо увеличения генерации электроэнергии преследуется повышение энергоэффективности, прежде всего в наиболее энергоёмких отраслях материального производства: промышленность, строительство, транспорт, связь.

На железнодорожном транспорте необходимость внедрения энергосберегающих технологий декларируют принятые Российскими железными дорогами программы развития «Стратегия научно-технического развития холдинга “РЖД” на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года», а также «Энергетическая стратегия холдинга “РЖД” на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года». В контексте представленного исследования особого интереса заслуживает Энергетическая стратегия, поскольку в ней устанавливаются основы стратегии холдинга в области потребления энергоресурсов и обеспечения эффективного энергосбережения.

На рис. 1 приведена структура энергобаланса ОАО «РЖД» за 2015 г. [7]. Видно, что главной статьёй энергопотребления является непосредственно тяга поездов – свыше 73 % от

общего энергобаланса. При этом более половины (58 %) энергоресурсов, потребляемых тяговой деятельностью, составляет электроэнергия, что объясняется значительной протяжённостью и преобладающей загруженностью в России электрифицированных железнодорожных линий.

Исходя из вышесказанного, прогнозирование динамики изменения данных энергетических показателей является достаточно актуальной задачей.

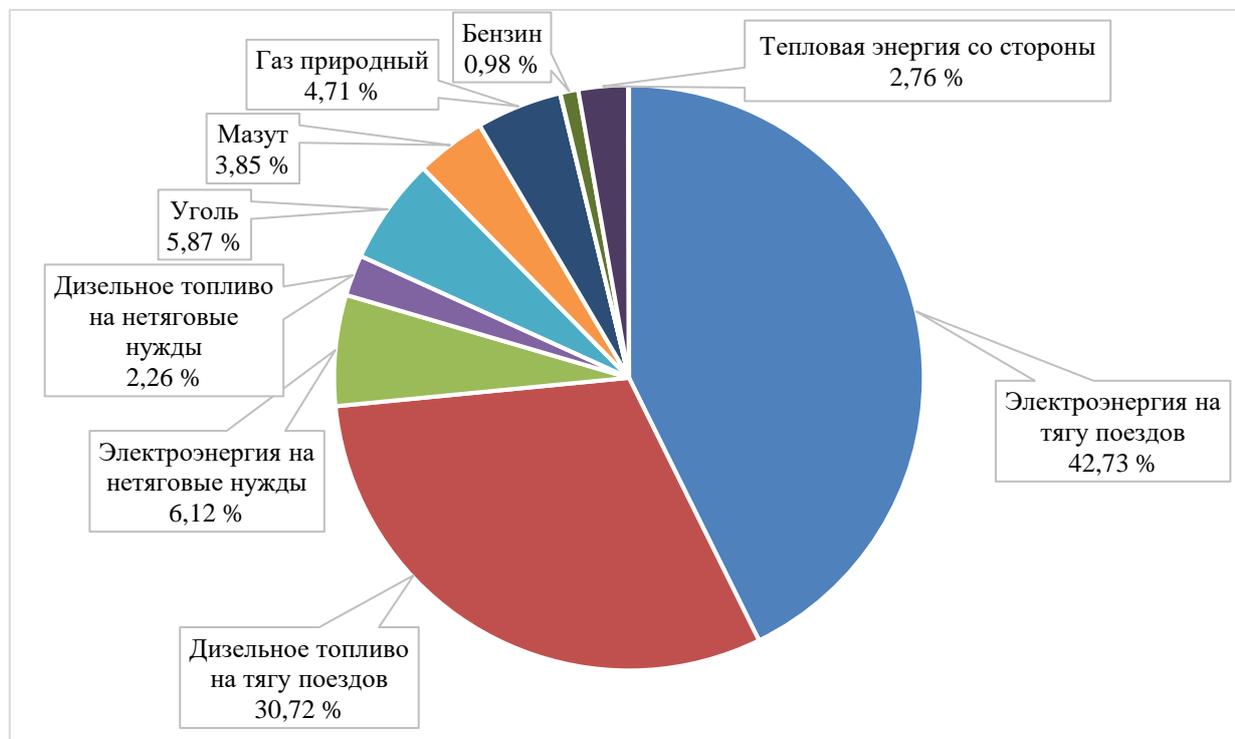


Рисунок 1. Структура энергетического баланса ОАО «РЖД» за 2015 г.

К настоящему времени разработано и широко применяется большое количество методов решения прогностических задач. В основе большинства из них лежит идея экстраполяции – получения информации о будущем какого-либо объекта на основе информации о его прошлом и настоящем. При этом различные методы прогнозирования отличаются в основном только применяемыми гипотезами о видах связей, соотношений и закономерностей, действующих на ретроспективном участке, и законах их распространения на перспективу.

Самыми многочисленными методами прогнозирования являются статистические, основанные на использовании статистической информации. Принципиальная возможность статистического прогнозирования существует благодаря свойству инерционности общественных процессов, т. е. невозможности их коренного изменения на коротком интервале времени.

#### Постановка цели и задач исследования

Целью исследования является разработка прогноза динамики снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов и повышения энергоэффективности тяговой деятельности на железных дорогах России методом интервального прогнозирования.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- 1) сбор данных для составления статистики удельного расхода электроэнергии на тягу поездов;
- 2) построение математической модели;
- 3) расчёт среднего квадратического отклонения ошибок аппроксимации;
- 4) подведение итогов прогнозирования динамики удельного расхода электроэнергии и представление их в виде трёх сценариев: пессимистического, консервативного и оптимистического.

### Исторические предпосылки снижения расхода электроэнергии на тягу поездов

Повышение энергоэффективности тяговой деятельности на электрифицированных железных дорогах является давним направлением работы отечественной науки и преимущественно достигалось благодаря модернизации подвижного состава – элемента системы «тяговая подстанция – контактная сеть – тяговая единица», осуществляющего непосредственно потребление электроэнергии и её преобразование в тяговое усилие [4].

Вклад в работу над увеличением энергетических показателей электроподвижного состава внёс широкий круг учёных и специалистов. Несмотря на это, тяговая деятельность по-прежнему имеет потенциал к повышению энергоэффективности. Так, один из основных энергетических показателей электровозов, коэффициент мощности  $K_m$ , в тяговом режиме составляет не более 0,84, а в режиме рекуперативного торможения не превышает 0,65, что не соответствует нормативам актуальных национальных стандартов в сфере энергетики [5, 6].

Тем не менее, прогресс в области повышения энергоэффективности как тяговой, так и нетяговой железнодорожной производственной деятельности продолжается. В связи с этим показатель удельного расхода электроэнергии на тягу поездов на железных дорогах России демонстрирует устойчивое снижение; дальнейшее прогнозирование динамики изменения этого показателя на перспективу и поставлено в рамках данной работы.

### Построение математической модели

После установления наиболее вероятного вида функции можно переходить к построению математической модели, которое сводится к определению коэффициентов функции. Эта задача обычно решается с помощью метода наименьших квадратов, суть которого состоит в нахождении функции, наилучшим образом описывающей исходный ряд. Критерием оптимальности в данном случае является минимальная величина квадратов разностей значений функции и исходных данных [2].

Практическая реализация метода интервального прогнозирования возможна средствами специализированных математических и статистических пакетов программ (MathCad, MatLab и др.). Уже долгое время наиболее доступной и широко используемой является программа Excel программного пакета Microsoft Office. Представленная в работе технология интервального прогнозирования также выполнена в Excel, вычислительные возможности которой достаточны для выполнения поставленных задач. Результаты построения математической модели методом наименьших квадратов сведены в таблицу 1. Построение полиномиальной линии тренда второго порядка представлено на рис. 2.

Таблица 1. Результаты построения математической модели методом наименьших квадратов

Год	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Удельный расход эл.-энерг. на тягу поездов, кВт·ч/10 тыс. т-км брутто	116,4	115,4	115,7	115,1	114,6	113,5	113,1	110,9
Расчет $y_i$	117,0	116,2	115,4	114,6	113,8	113,0	112,2	111,4
Продолжение таблицы								
Год	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	2030
Удельный расход эл.-энерг. на тягу поездов, кВт·ч/10 тыс. т-км брутто	109,6	109,3	109,0	-	-	-	-	-
Расчет $y_i$	110,6	109,8	109,0	108,2	107,5	106,7	102,7	98,7

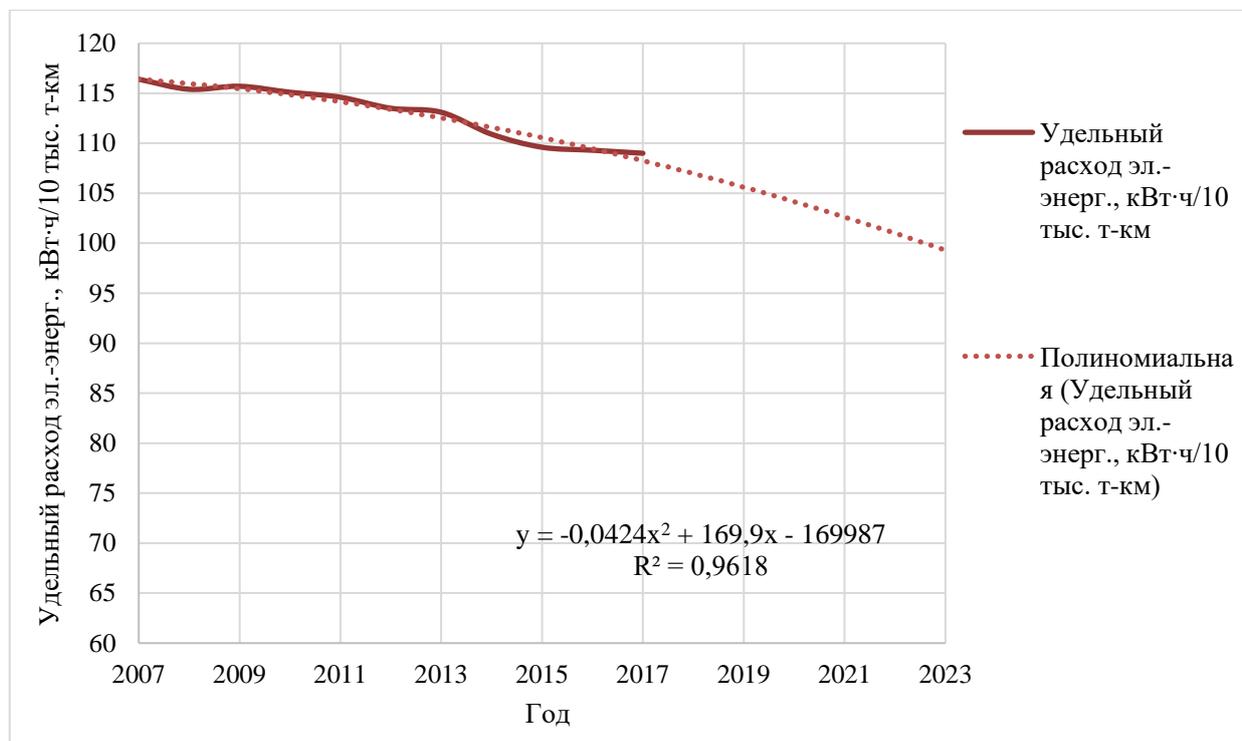


Рисунок 2. Построение полиномиальной линии тренда второго порядка

Качество математической модели обычно оценивается по степени близости исходных данных и соответствующих точек тренда с использованием т. н. коэффициента корреляции  $R$ . Максимально возможное значение  $R$  равно единице (полное совпадение графика и линии тренда). Достоверность аппроксимации признается хорошей при величине  $R^2 \geq 0,81$ ; исходя из этого построенную в рамках работы математическую модель с  $R^2 = 0,9618$  можно считать достоверной.

### Расчёт среднего квадратического отклонения и ошибок аппроксимации

Средняя ошибка прогноза тренда вычисляется по формуле

$$m = \sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{t_k^2}{\sum t_i^2}} = \sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{12 \times t_k^2}{n^3 - n}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение ошибок аппроксимации,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{Pi})^2}{n - p}}, \quad (2)$$

$n$  – количество интервалов наблюдения;

$t_k$  – номер интервала прогноза, считая от середины интервала наблюдения;

$t_i$  – номер интервала, считая от середины интервала наблюдения;

$y_i$  – исходные данные;

$y_{Pi}$  – расчёт по уравнению тренда;

$p$  – число параметров (коэффициентов) тренда [2].

Ошибка прогноза  $\Delta y$  должна учитывать ошибку аппроксимации:

$$\Delta y = \sqrt{\sigma^2 + (t \times m)^2}, \quad (3)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента, при выбранной вероятности  $\alpha = 0,9$  равный 1,74 [1].

Результаты ошибок прогноза представлены в таблице 2.

**Таблица 2. Результаты ошибок прогноза**

Параметр	Значение		
Среднее квадратическое отклонение $\sigma$	0,7827		
Год прогноза	2018	2019	2020
Средняя ошибка прогноза $m$	0,7539	0,8494	0,9461
Ошибка прогноза $\Delta y$	1,6287	1,7895	1,9559

Таким образом, с вероятностью  $\alpha = 0,9$  (или 90 %) прогнозируемая величина не выйдет за пределы  $y_i \pm \Delta y$  (рассчитанное в таблице 1 значение  $\pm$  ошибка прогноза).

Результаты расчёта пределов прогноза сведены в таблицу 3 в виде трёх сценариев: пессимистического, консервативного и оптимистического.

**Таблица 3. Результаты прогнозирования сценариев развития тренда**

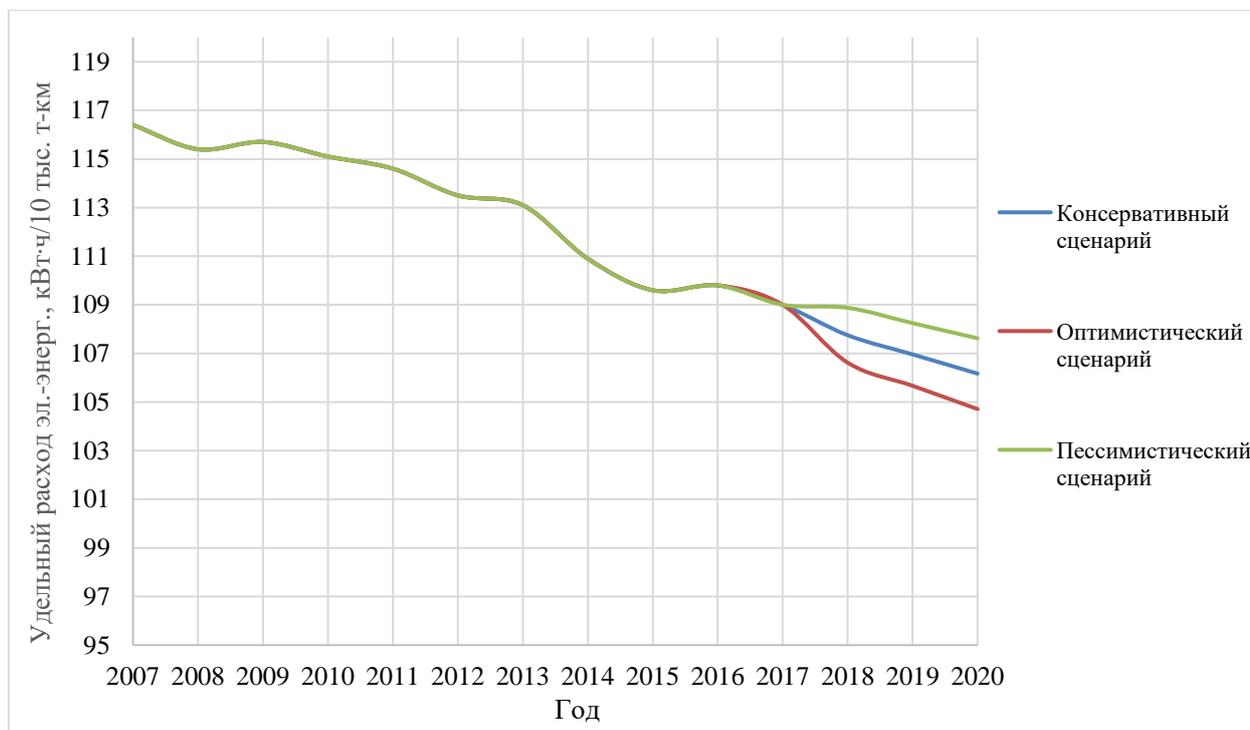
Год прогноза	Пессимистический сценарий ( $y_i - \Delta y$ ), кВт·ч/10 тыс. т-км	Консервативный сценарий ( $y_i + \Delta y$ ), кВт·ч/10 тыс. т-км	Оптимистический сценарий ( $y_i + \Delta y$ ), кВт·ч/10 тыс. т-км
2018	109,88	108,25	106,62
2019	109,25	107,46	105,67
2020	108,62	106,67	104,71

### Заключение

По результатам выполненных расчётов может быть составлена общая картина развития тренда, построенная по методу интервального прогнозирования пессимистического, консервативного и оптимистического сценариев развития событий. Итоговый результат расчёта представлен в таблице 4 и на рис. 3.

**Таблица 4. Прогноз сценариев развития динамики удельного расхода электроэнергии на тягу поездов**

Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Пессимистический сценарий	110,9	109,6	109,8	109,0	109,88	109,25	108,62
Консервативный сценарий					108,25	107,46	106,67
Оптимистический сценарий					106,62	105,67	104,71



**Рисунок 3. Построение линий прогноза сценариев развития динамики удельного расхода электроэнергии на тягу поездов**

Таким образом, с вероятностью 90 % к 2020 г. удельный расход электроэнергии на тягу поездов будет находиться в пределах  $106,67 \pm 1,96$  или в интервале от 104,71 до 108,62 кВт·ч/10 тыс. т-км брутто.

### Библиографический список

1. Антохонова И. В. Методы прогнозирования социально-экономических процессов / И. В. Антохонова // Учебное пособие. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2005. – 212 с.
2. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев // Наука, 13-е издание. – Москва, 1986. – 545 с.
3. Бурдасов Б. К. Современное состояние и тенденции развития статических полупроводниковых преобразователей для магистральных электровозов переменного тока / Б. К. Бурдасов, В. А. Толстых // Электротехническая промышленность. – 1988. – Вып. № 17. – С. 1-28.
4. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.
5. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144-2013. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
6. Электровозы. Общие технические требования: ГОСТ Р 55364-2012. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 36 с.
7. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года / Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. – Москва: 2016. – 76 с.

### References

1. Antohonova I. V.: Methods of Socio-Economic Processes Prediction / I. V. Antohonova // School-book. – Ulan-Ude: Printed by East Siberia State University of Technology and Management, 2005. – 212 p.

2. Bronstein I. N.: Mathematics Hand-book for Engineers and Higher Education Students / I. N. Bronstein, K. A. Semendyaev // Printed by “Science”, 13th Edition. – Moscow, 1986. – 545 p.
3. Burdasov B. K.: Modern State and Development Tendencies of Static Semi-Conductor Converters for Main-Line AC Locomotives / B. K. Burdasov, V. A. Tolstyh // Electrotechnical Industry. – 1988. – Vol. 17. P. 1-28.
4. Tihmenev B. N., Kuchumov V. A.: Alternating Current Electric Locomotives With Thyristor Converters. – Printed by “Transport”, Moscow, 1988. – 311 p.
5. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical devices. Electric energy quality regulations for utility power grids. GOST 32144-2013. Introduced 2014-07-01. – Printed by “Standartinform”, Moscow, 2014. – 16 p.
6. Electric locomotives. General technical demands. GOST 55364-2012. Introduced 2014-01-01. – Printed by “Standartinform”, Moscow, 2013. – 36 p.
7. Energy Strategy of JSCo RZD until 2020 and towards 2030 / Approved 12.14.2016 by direction N. 2537r. – Moscow, 2016. – 76 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Баринов Игорь Александрович**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Ул. Чернышевского, д. 15, Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 914 907-37-20.

E-mail: ib4558@yahoo.com.

### **Иванов Владислав Сергеевич**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

Ул. Чернышевского, д. 15, Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

Тел.: +7 983 153-10-75.

E-mail: vladislav-sergeevich-irgups@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Barinov Igor Alexandrovich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).  
15, Chernyshevsky str., 664074, Russian Federation.

Ph.D. student of the Department of Electric Rolling Stock, ISTU.

Phone: +7 914 907-37-20.

E-mail: ib4558@yahoo.com.

### **Ivanov Vladislav Sergeevich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).  
15, Chernyshevsky str., 664074, Russian Federation.

Ph.D. student of the Department of Electric Rolling Stock, ISTU.

Phone: +7 983 153-10-75.

E-mail: vladislav-sergeevich-irgups@mail.ru.

## Для цитирования

Баринов И. А. Интервальное прогнозирование динамики удельного расхода электроэнергии на тягу поездов в контексте развития технологии рекуперации энергии [Электронный ресурс] / И. А. Баринов, В. С. Иванов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2018. – № 2. – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 08.10.2018).

## For citation

Barinov I. A.: Interval Prediction of Train Traction Electrical Energy Rate Dynamics for Energy Regeneration Development [Digital resource] / Igor A. Barinov, Vladislav S. Ivanov // “Young Science of Siberia”: digital scientific journal. – 2018. – № 2. – Access mode: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>, free. – Title from the screen. – Languages: Russian, English (appeal date: 08.10.2018).