

УДК 629.423.1

Е. Г. Авдиенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ КОРРЕКТИРОВКИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ГРАФИКОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ

**Аннотация.** Актуальность работы заключается в поиске новых методов и средств к поиску оптимальных графиков движения по данным реальных измерений и изменению межпоездного интервала согласно сформированным стратегиям цифровой трансформации ОАО «РЖД». В работе выполнен поиск оптимального графика движения за счёт смещения времени отправления поездов на 3, 6 и 9 минут соответственно. Выполнен анализ научных трудов в области повышения пропускной способности участка и корректировки графиков движения поездов.

Обоснованы возможности по смещению отправления поездов на соответствующий промежуток (3, 6 и 9 минут), что позволило снизить пиковые значения токов между подстанциями Смазнево – Тягун, Тягун – Артышта 2. Смещение отправления отразилось на снижении удельного расхода электроэнергии на исследуемых участках. Обоснована возможность снижения межпоездного интервала с 10 до 9 минут, что положительно скажется на повышении пропускной способности участка. Пропускная способность увеличилась со 140 пар поездов до 155 пар поездов в сутки.

В заключении представлена реализация построения оптимального графика движения на основе смещения отправления поездов, что и позволило снизить удельных расход электроэнергии.

**Ключевые слова:** электроподвижной состав, автоведение, цифровая железная дорога, энергооптимальный путь, график движения

Е. G. Avdienko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation

## INCREASING THE EFFICIENCY OF OPERATION OF ELECTRIC ROLLING STOCK ON THE BASIS OF ADJUSTING ENERGY-SAVING TRAIN SCHEDULES ACCORDING TO THESE MEASUREMENTS

**Abstract.** The relevance of the work lies in the search for new methods and means for finding optimal traffic schedules based on real measurements and changing the inter-train interval in accordance with the digital transformation strategies of Russian Railways. The paper searches for the optimal traffic schedule by shifting the departure time of trains by 3, 6 and 9 minutes, respectively. The analysis of scientific papers in the field of increasing the throughput capacity of the section and adjusting train schedules has been carried out. The possibilities for shifting the departure of trains by the corresponding interval (3, 6 and 9 minutes) are substantiated, which made it possible to reduce the peak value of the currents between the substations Smaznevo - Tyagun, Tyagun - Artysha 2. The shift of the departure was reflected in the decrease in the specific consumption of electricity in the studied sections. The possibility of reducing the inter-train interval from 10 to 9 minutes is substantiated, which will positively affect the increase in the throughput of the section. Throughput increased from 140 pairs of trains to 155 pairs of trains per day. In conclusion, the implementation of building an optimal traffic schedule based on the displacement of train departures is presented, which made it possible to reduce the specific energy consumption.

**Keywords:** electric rolling stock, autopilot, digital railway, energy-optimal path, train sheet

### Введение

Компанией ОАО «РЖД» была сформирована стратегия цифровой трансформации, программа развития холдинга и научно-технический проект. К основным задачам они относят следующие аспекты, как повышение эффективности деятельности компании и повышении конкурентоспособности в мире. Это будет осуществляться благодаря применению

современных прорывных информационных технологий [1 и 2]. Согласно этим концепциям и стратегиям, компания ОАО «РЖД» обеспечит содействие при внедрении таких технологий как «Internet of things», «Big Data», «Simulation modeling». Внедрение данных технологий позволит учитывать новые типы поступающих данных, а также с большей скоростью их обрабатывать, реализуется учёт заданного графика движения поездов, текущие возможности инфраструктуры и т.д.

Выделим приоритетные направления развития автоматизации систем автоведения благодаря современным методам и средствам управления подвижным составом. Планируется разработка современных бортовых систем безопасности с применением технологий искусственного интеллекта, реализация системы «беспилотного управления» на основе оцифрованной модели инфраструктуры, разработка современной технологии сбора и обработки информации.

В настоящее время результативность системы автоматического управления подвижным составом возможно установить по следующим критериям [4, 5]:

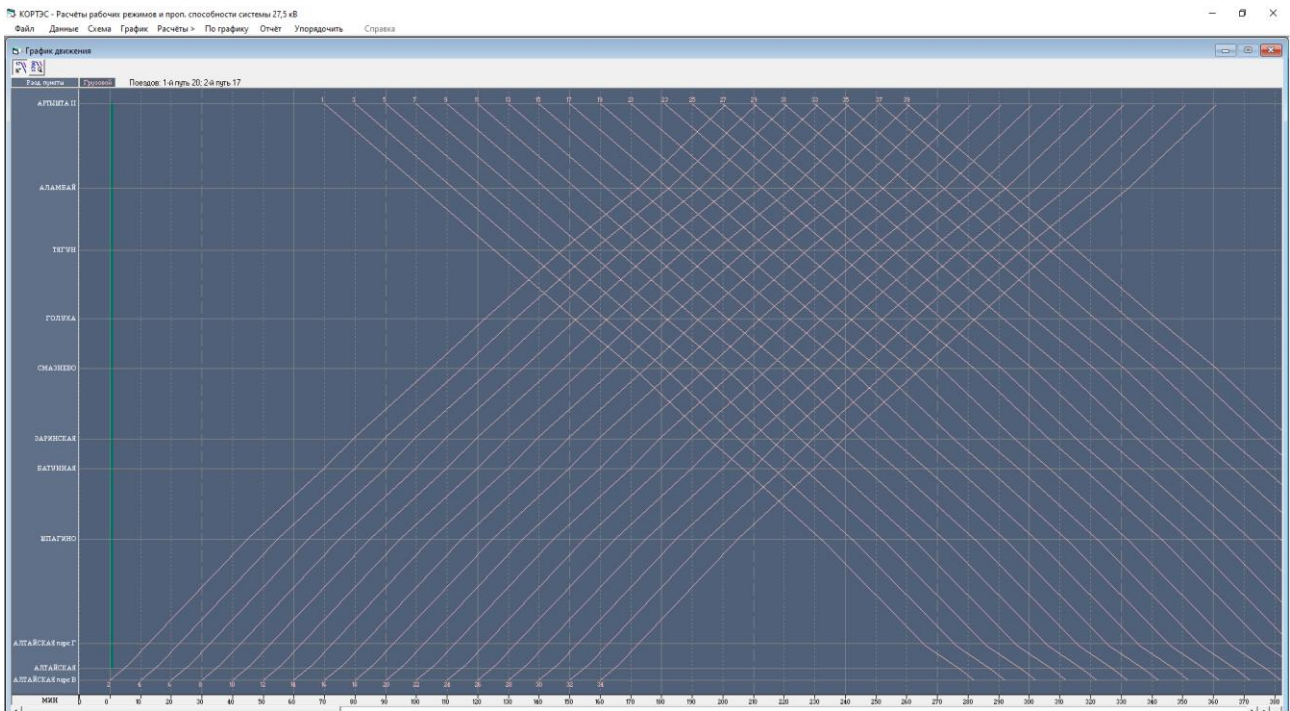
- повышением использования пропускной способности и увеличением провозной способности за счет более точного исполнения графика движения;
- повышением безопасности движения за счет уменьшения вероятности опасного сближения поездов;
- уменьшением затрат энергии на тягу поезда за счет выбора энергооптимальных режимов управления поездом и оптимального по критерию минимума энергозатрат распределения времени хода по линии на время хода по перегонам [6 – 15].

#### **Объекты и методы исследования**

Для проведения исследований для реализации мероприятий по повышению пропускной способности грузовой линии выбран участок между подстанциями Смазнево, Тягун, Артышта 2. Выбор данного участка обоснован различным профилем пути, что позволит выполнить корректировку по поиску оптимального графика движения поездов. Моделирование выполнено в программе КОРТЕС. В процессе моделирования использован грузовой электровоз ВЛ80 с массой состава 3999 тонн. Длина участка между подстанциями Смазнево и Артышта 2 равняется 91,7 км. В чётном направлении 17 пар поездов, в нечетном 20 пар поездов. Межпоездной интервал составляет 10 минут. Корректировка графика движения происходит за счёт смещения отправления поездов. Всего будет три смещения.

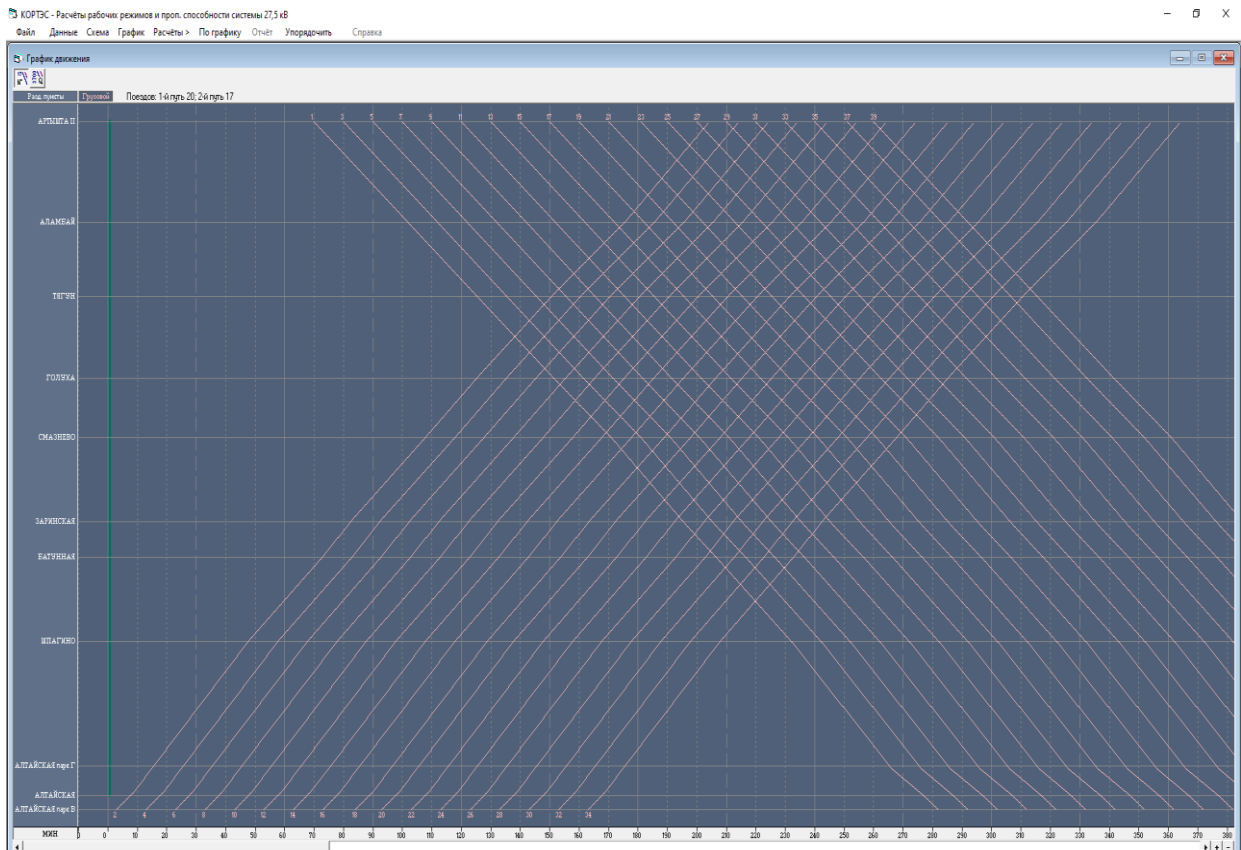
1. Первое смещение отправления на 3 минуты;
2. Второе смещение отправления на 6 минут;
3. Третье смещение отправления на 9 минут.

На рисунке 1 представлен исходный график движения без смещения по отправлению. Относительно него будет происходить сравнение после смещения графика.

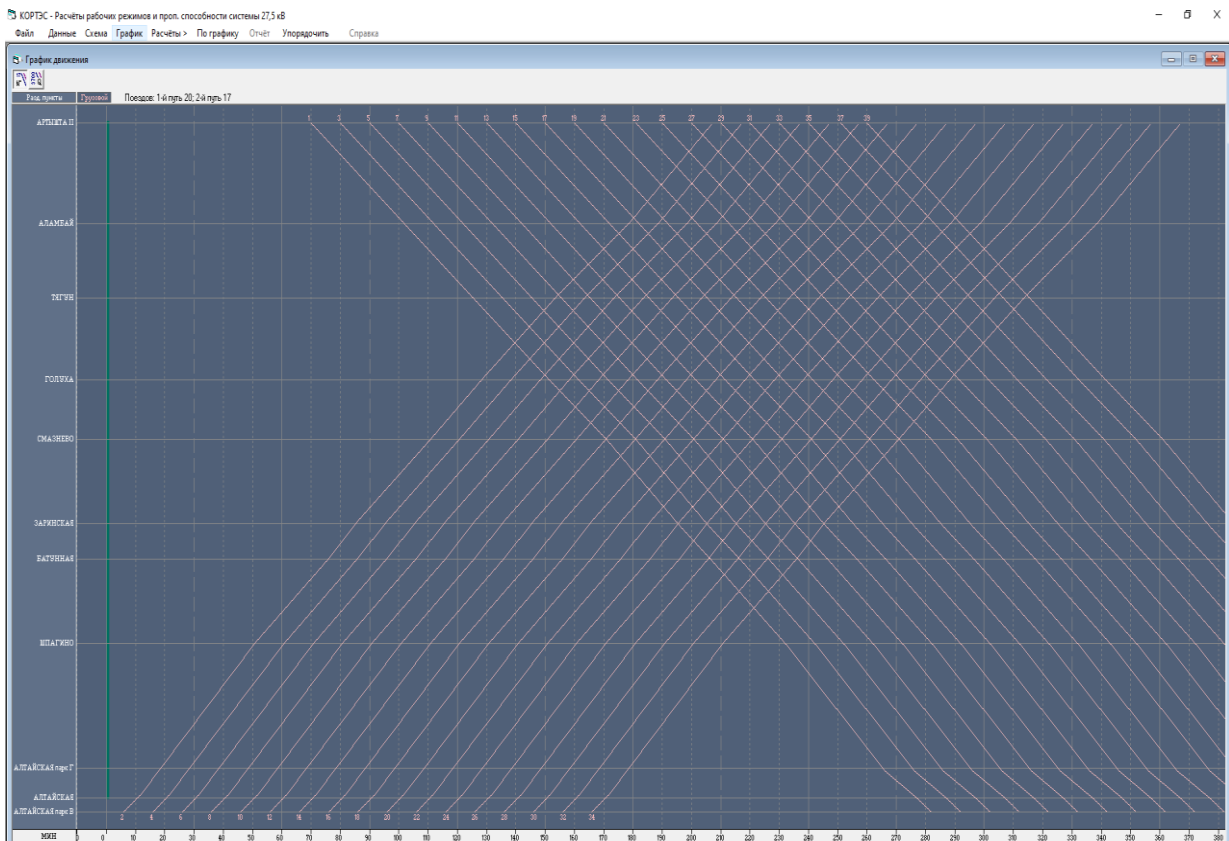


**Рис. 1. Исходный график движения поездов**

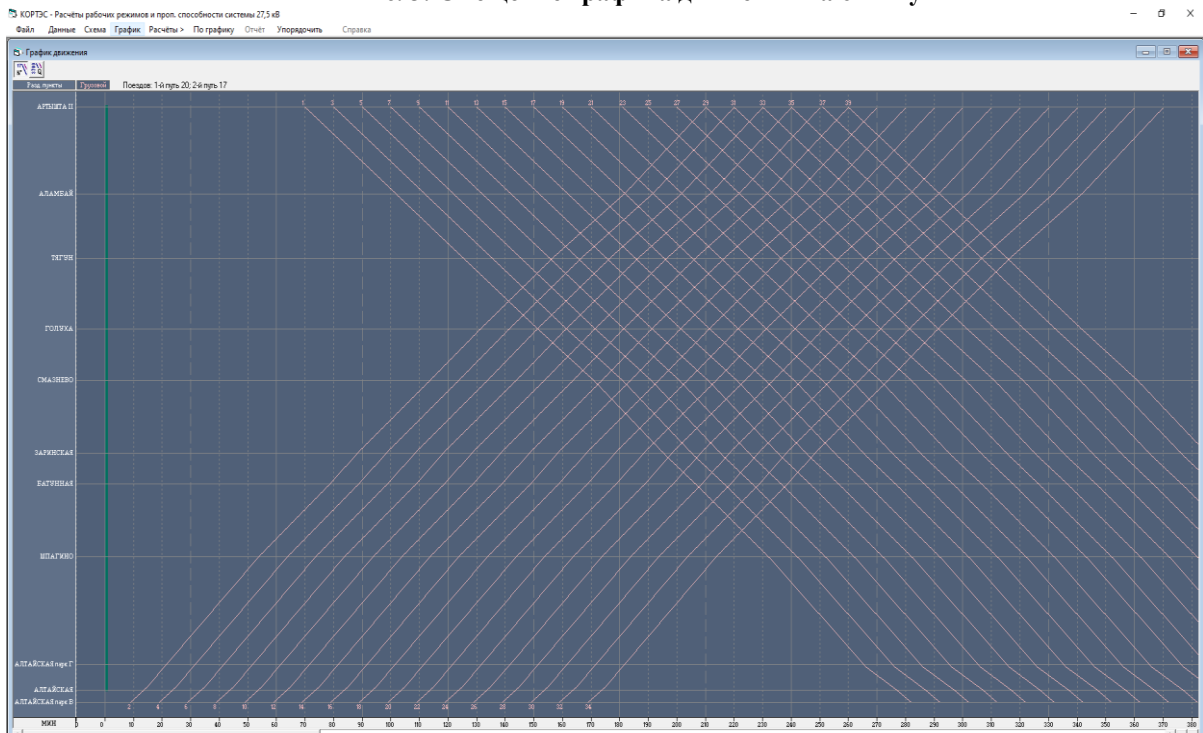
Выполним моделирование последующих параллельных графиков движения. Смещение графиков будем производить на 3 минуты (отправление пар поездов соответственно будет происходить на 3, 6 и 9 минутах). На рисунках 2, 3, 4 отобразим данное смещение отправления.



**Рис. 2. Смещение графика движения на 3 минуты**

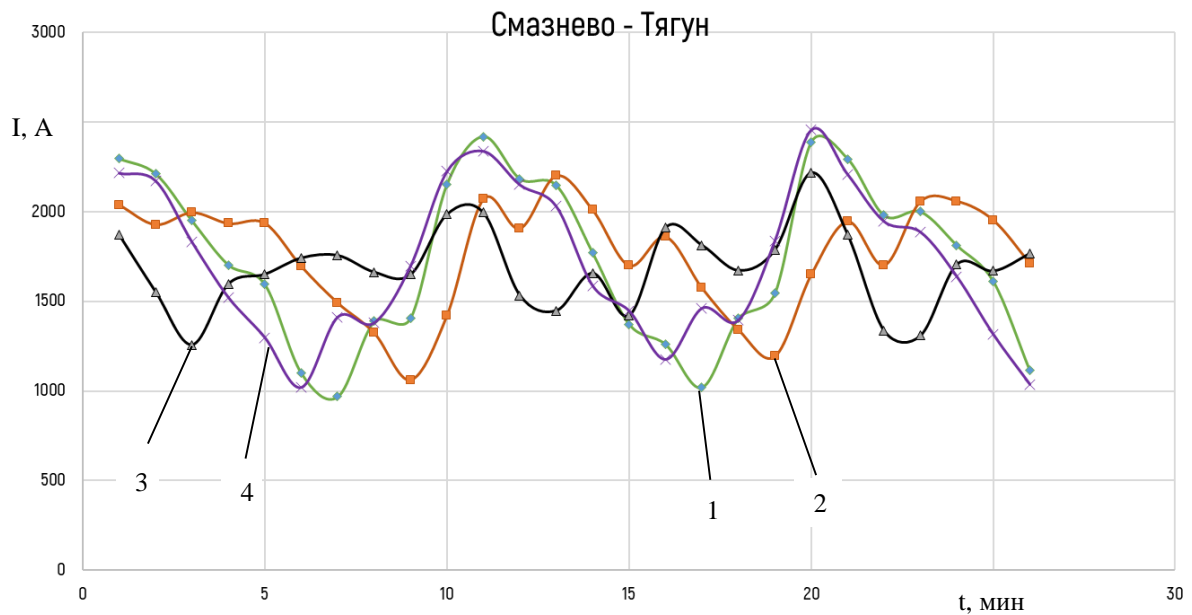


**Рис. 3. Смещение графика движения на 6 минут**



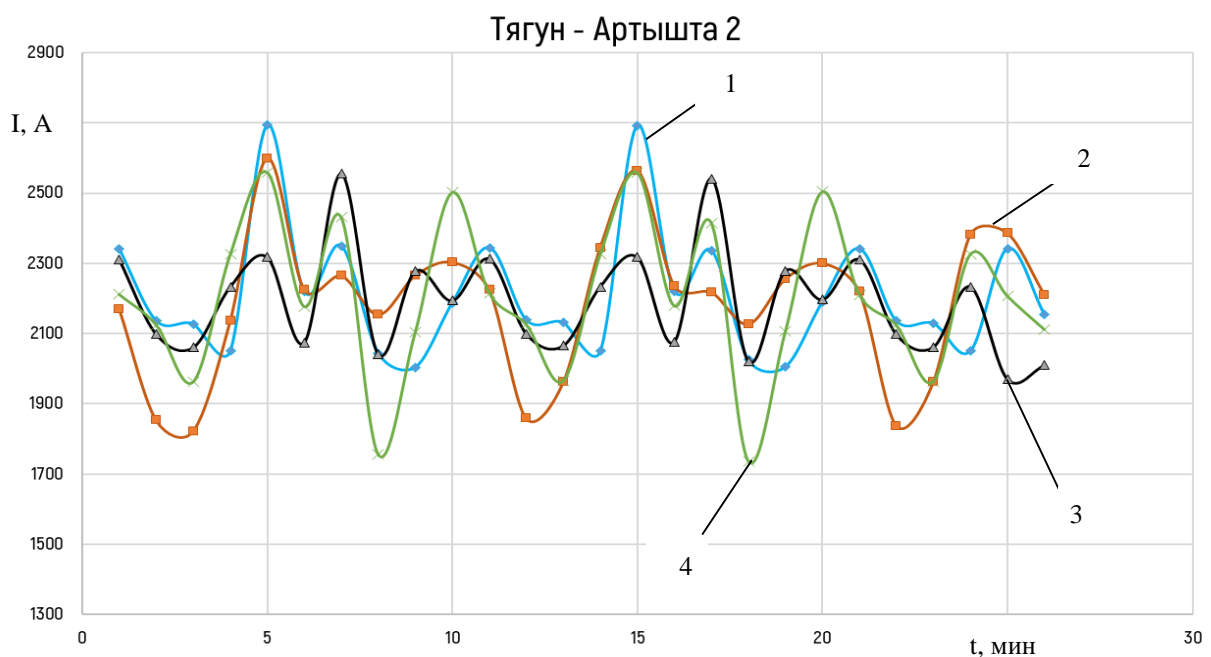
**Рис. 4. Смещение графика движения на 9 минут**

Сравним представленные графики (рисунок 5, 6) движения по пиковым суммарным значениям токов между правым плечом подстанции Смазнево и левым плечом подстанции Тягун, правым плечом подстанции Тягун и левым плечом подстанции Артышта 2. Пиковые значения получены в период с 230 по 255 минуту движения методом мгновенных схем.



**Рис. 5. Пиковые значения токов между подстанциями  
Смазнево – Тягун**

**1 – исходный график, 2 – смещение на 3 минуты, 3 – смещение на 6 минут, 4 – смещение на 9 минут**



**Рис. 6. Пиковые значения токов между подстанциями  
Тягун – Артышта 2**

**1 – исходный график, 2 – смещение на 3 минуты, 3 – смещение на 6 минут, 4 – смещение на 9 минут**

Из графиков видно, что значения токов на протяжении всего пути движения изменяются, в зависимости от изначального смещения. Смещение графика движения на 3 и 6 минут позволило добиться меньших пиковых значений токов, т.е характер данных кривых стал более плавным. Смещение графика на 9 минут в некоторых минутах имеет большую схожесть с исходным графиком движения без смещения, что говорит о малой эффективности длительного смещения.

Подтверждением, что смещение на 3 и 6 минут позволяет получить оптимальные графики движения, выполним оценку полного расхода электроэнергии на смоделированном участке. Данные представим в таблице 1.

**Таблица 1 – Полный расход электроэнергии**

Станции	Исходный график (кВт·ч)	Смещение на 3 минуты (кВт·ч)	Смещение на 6 минут (кВт·ч)	Смещение на 9 минут (кВт·ч)
Смазнево	18459	18445	18201	18593
Тягун	18734	18663	18433	18635
Артышта 2	10420	10357	10429	10407
Суммарный расход	47613	47465	47063	47635

Выполним расчёт удельного расхода электроэнергии по следующей формуле:

$$a_{уд} = \frac{A_{\phi} \cdot 10^4}{m_{п} \cdot L} \quad (2)$$

где  $A_{\phi}$  – фактический расход электроэнергии, кВт·ч;

$m_{п}$  – масса поезда (масса электровоза и состава), т;

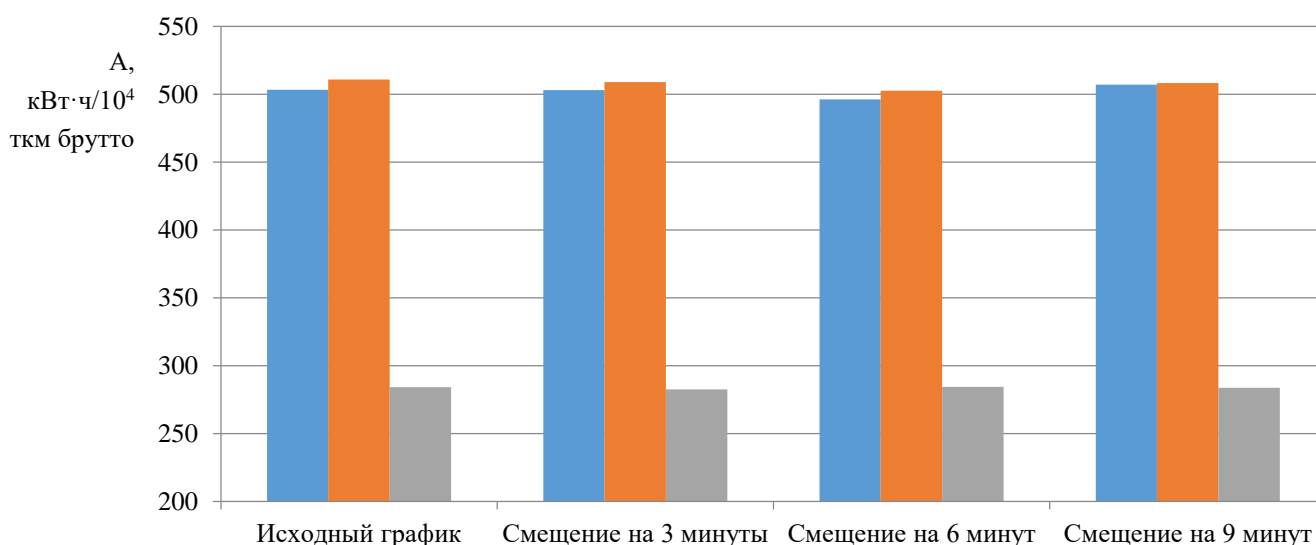
$L$  – длина участка, км.

Сведём данные по удельному расходу в таблицу 2.

**Таблица 2 – Удельный расход электроэнергии**

Станции	Исходный график (кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто)	Смещение на 3 минуты (кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто)	Смещение на 6 минут (кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто)	Смещение на 9 минут (кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто)
Смазнево	503,3701	502,9883	496,3346	507,0242
Тягун	510,8693	508,9331	502,6611	508,1696
Артышта 2	284,1496	282,4316	284,395	283,795

Отообразим удельный расход в виде диаграммы на рисунке 7.



**Рис. 7. Удельный расход электроэнергии  
1 – п. Смазнево, 2 – п. Тягун, 3 – п. Артышта – 2**



Минимальный удельный расход электроэнергии показывает график движения, смещённый на 6 минут. Можно сделать вывод, что корректировка графика движения позволяет незначительно снизить расход электроэнергии.

Для дальнейшего моделирования возьмём график движения, смещённый на 6 минут. Обозначим его как оптимальный. Произведём уменьшение межпоездного интервала с 10 до 9 и 8 минут. Это позволит увидеть, как изменится расход электроэнергии за счёт сокращения межпоездного интервала и как изменится пропускная способность на этом участке. Сведём полученные результаты по полному расходу электроэнергии в таблицу 3

**Таблица 3 – Полный расход электроэнергии**

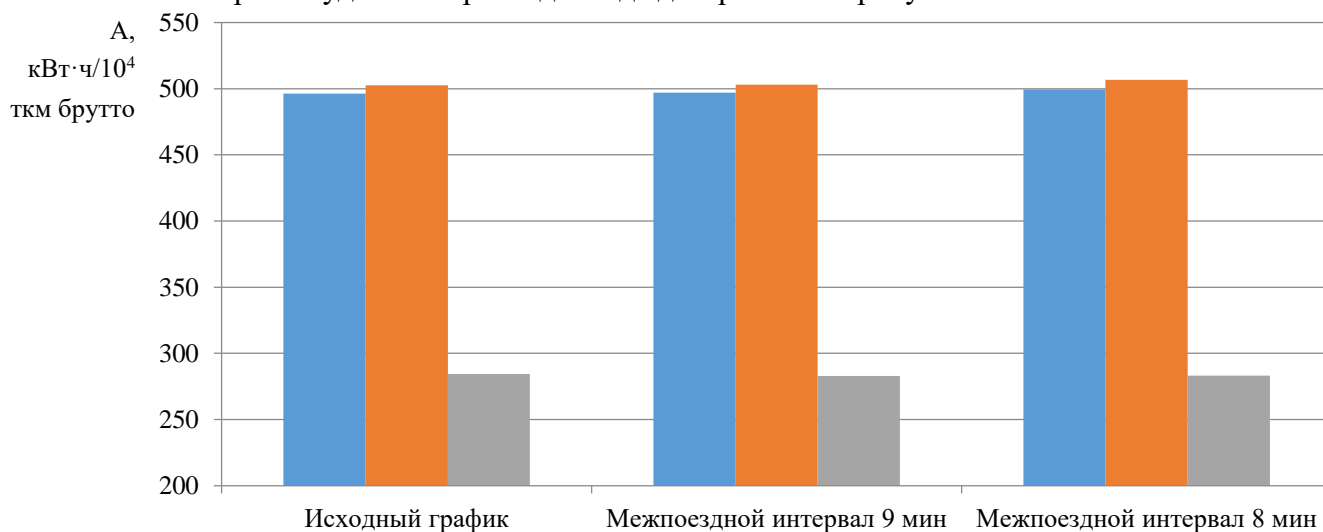
Станции	Исходный график (кВт·ч)	Межпоездной интервал 9 минут (кВт·ч)	Межпоездной интервал 8 минут (кВт·ч)
Смазнево	18201	18223	18313
Тягун	18433	18453	18579
Артышта 2	10429	10378	10385
Суммарный расход	47063	47054	47277

Рассчитаем удельный расход электроэнергии, сведём данные в таблицу 4.

**Таблица 4 – Удельный расход электроэнергии**

Станции	Исходный график (кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто)	Межпоездной интервал 9 минут (кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто)	Межпоездной интервал 8 минут (кВт·ч/10 <sup>4</sup> ткм брутто)
Смазнево	496,3346	496,9345	499,3888
Тягун	502,6611	503,2065	506,6425
Артышта 2	284,395	283,0042	283,1951

Отообразим удельный расход в виде диаграммы на рисунке 8.



**Рис. 8. Удельный расход электроэнергии**  
1 – п. Смазнево, 2 – п. Тягун, 3 – п. Артышта - 2

Видно, что сокращение межпоездного интервала до 8 минут увеличивает удельный расход электроэнергии, по сравнению с исходным графиком. А сокращение межпоездного интервала до 9 минут, незначительно влияет на удельный расход электроэнергии, по сравнению с исходным графиком.

Рассчитаем влияние от снижения межпоездного интервала на пропускную способность на данном участке по следующей формуле 3:

$$N = \frac{1400}{I_{ин}} \quad (3)$$

где  $I_{ин}$  - временной интервал движения между поездами, мин.

$$N_{10} = \frac{1400}{10} = 140 \text{ пар поездов}$$

$$N_9 = \frac{1400}{9} \approx 155,5 = 155 \text{ пар поездов}$$

Сделаем заключение о том, что снижение межпоездного интервала возможно на участке Алтайская – Артышта. Это позволит повысить пропускную способность участка на 10,7%, а именно пустить на 15 пар поездов в сутки больше.

### Заключение

В статье представлена возможность по реализации энергосберегающих графиков движения по данным измерений. Подразумевается корректировка графиков движения на основе смещения межпоездного интервала на 3, 6 и 9 минут соответственно. Данное смещение позволяет получить оптимальный график движения с минимальным расходом электроэнергии. Это достигается за счёт того, что получается добиться такого варианта следования поездов, при котором, один поезд движется на подъем в режиме тяги, а другой движется на спуск в режиме выбега, или два движутся на подъем в режиме тяги, а встречный спускается в режиме выбега (рис.9).

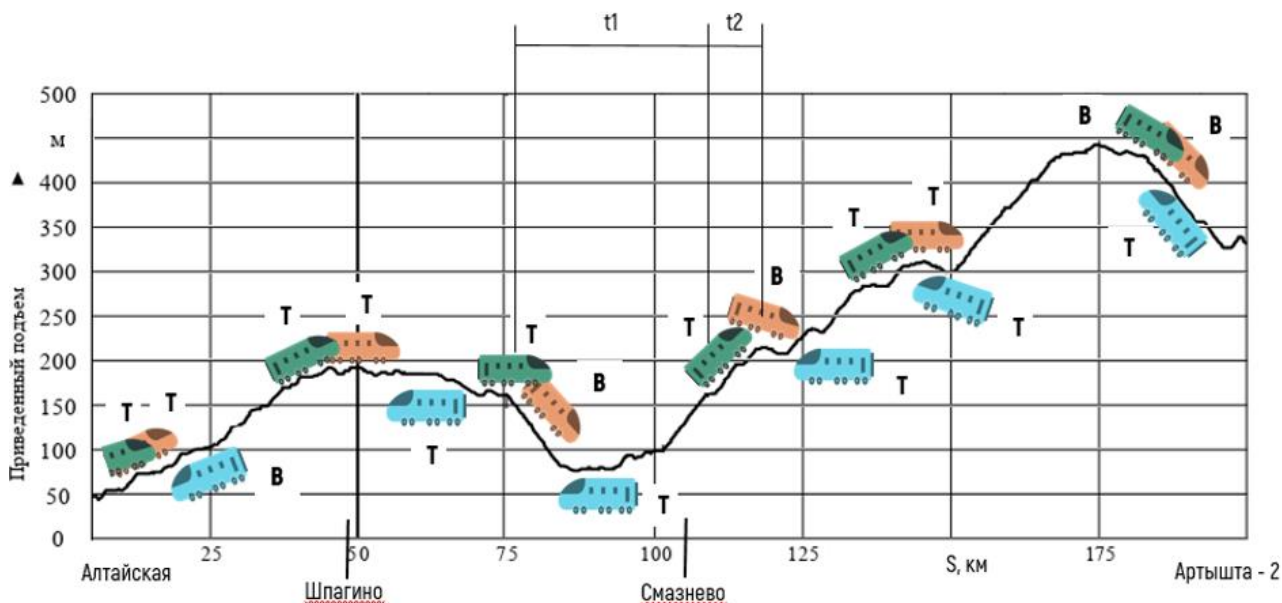


Рис. 9. Реализация оптимального графика

$t_1$  – межпоездной интервал ( 10 минут ),  $t_2$  – смещение отправления поездов на 6 минут, Т – режим «Тяга, В – режим «Выбег».



Предложена возможность снижения межпоездного интервала на участке Алтайская – Артышта 2 с 10 до 9 минут на основе скорректированных графиков движения. Снижение межпоездного интервала позволяет повысить пропускную способность участка до 155 пар поездов в сутки (было 140 парпоездов).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» № 466р. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018. / Правительство Российской Федерации. М., 2019. 135 с.
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года № 466р. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018. / Президент Российской Федерации. М., 2018. 19 с.
3. Концепция реализации комплексного научно технического проекта «Цифровая железная дорога» № 1285р. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 05.12.2017. / ОАО «РЖД». М., 2017. 92
4. Баранов, Л.А. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом : учебник в 3 ч. Ч. 1. Теория автоматического управления / Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков и др.; под ред. Л.А. Баранова и А.Н. Савоськина. – Москва, 2014. 400 с.
5. Баранов, Л.А. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов; под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. 272 с.
6. Бушуев С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог / С.В. Бушуев // Эксплуатация транспортных систем. – 2022. – №4. 343с.
7. Баранов, Л.А. Оптимизация управления движением поездов : учеб. пособие / Л.А. Баранов, Е.В. Ерофеев, И.С. Мелешин, Л.М. Чинь; под ред. д.т.н., проф. Л.А. Баранова. – Москва. МИИТ, 2001.164 с.
8. Курбасов А. С. Увеличение скоростей на железных дорогах России: возможности и преимущества / А. С. Курбасов. // Транспорт российской федерации. – 2011. – №6. 20с.
9. Мугинштейн, Л.А., Лисицын А.Л. Нестационарные режимы тяги (Сцепление. Критическая норма массы поезда). – Момсква: Интекст, 1996. 176 с.
10. Benedikt Eberhardinger; Wolfgang Reif; Franz Wotawa; Tom Holvoet. Quality Assurance for Self-Adaptive, Self-Organising Systems (Message from the Workshop Organisers). 2014 IEEE Eighth International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops. DOI: 10.1109/SASOW.2014.30
11. Guojian Cheng; Tianshi Liu; Xiaoxiao Wang; Quanzhou Huang. Rapid Training for Self-Organizing Neural Networks with Incremental. 2006. Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. DOI: 10.1109/ISDA.2006.222
12. Y. Kawauchi; M. Inaba; T. Fukuda. Self-organizing intelligence for cellular robotic system 'CEBOT' with genetic knowledge production algorithm. Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. DOI: 10.1109/ROBOT.1992.220269.
13. Thomas B. Sheridan. Adaptive Automation, Level of Automation, Allocation Authority, Supervisory Control, and Adaptive Control: Distinctions and Modes of Adaptation. 2011. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. DOI: 10.1109/TSMCA.2010.2093888
14. Scheepmaker, G.M., Pudney, P.J., Albrecht, A.R., Goverde, R.M.P., Howlett, P.G. Optimal running time supplement distribution in train schedules for energy-efficient train control. (2020) Journal of Rail Transport Planning and Management, 14, статья № 100180. DOI:10.1016/j.jrtpm.2020.100180.
15. Phalgun Madhusudan; DB Rathankumar; K Aishwarya; G S Anitha. Computationally

Efficient Algorithms and High-Speed ASIC design for Railway Gate Automation. 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). DOI: 10.1109/ICCMC.2018.8488089.

## REFERENCES

1. Dolgosrochnaja programma razvitija otkrytogo akcionernogo obshhestva «Rossijskie zheleznye dorogi» № 466r. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018. / Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii. M., 2019. 135 p.
2. O nacional'nyh celjah i strategicheskikh zadachah razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda № 466r. Utv. Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 07.05.2018. / Prezident Rossijskoj Federacii. M., 2018. 19 p.
3. Konceptija realizacii kompleksnogo nauchno tehničeskogo proekta «Cifrovaja zheleznaja doroga» № 1285r. Utv. rasporjazheniem OAO «RZhD» ot 05.12.2017. / OAO «RZhD». M., 2017. 92 p.
4. Malahov S.V. Optimizacija jenergozatrata na tjagu poezdov na osnove utochnennogo metoda tjagovyh raschjotov: special'nost'. Doctor's thesis, Malahov Sergej Valer'evich; Rossijskij universitet transporta. – Moskva, 2021. pp. 6-12.
5. Perestenko A.Ju. Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovanija magistral'nyh gruzovyh jelektrovozov posredstvom upravlenija rezhimami jekspluatacii. Doctor's thesis, Shantarenko Sergej Georgevich; Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija. – Omsk, 2021. pp. 5-15.
6. Bushuev S. V. Puti povysheniya provoznoj sposobnosti uchastkov zheleznyh dorog / S.V. Bushuev // Ekspluatacija transportnyh sistem. – 2022. – №4. 343c.
7. Baranov, L.A. Optimizacija upravleniya dvizheniem poezdov : ucheb. posobie / L.A. Baranov, E.V. Erofeev, I.S. Meleshin, L.M. CHin'; pod red. d.t.n., prof. L.A. Baranova. – Moskva. MIIT, 2001. 164 s.
8. Kurbasov A. S. Uvelichenie skorostej na zheleznyh dorogah Rossii: vozmozhnosti i preimushchestva / A. S. Kurbasov. // Transport rossijskoj federacii. – 2011. – №6. 20s.
9. Muginshtejn L.A., Lisicyan A.L. Nestacionarnye rezhimy tjagi [Unsteady thrust modes]. – M.: Intekst, 1996. 176 p.
10. Benedikt Eberhardinger; Wolfgang Reif; Franz Wotawa; Tom Holvoet. Quality Assurance for Self-Adaptive, Self-Organising Systems (Message from the Workshop Organisers). 2014 IEEE Eighth International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshops. DOI: 10.1109/SASOW.2014.30
11. Guojian Cheng; Tianshi Liu; Xiaoxiao Wang; Quanzhou Huang. Rapid Training for Self-Organizing Neural Networks with Incremental. 2006. Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. DOI: 10.1109/ISDA.2006.222
12. Y. Kawauchi; M. Inaba; T. Fukuda. Self-organizing intelligence for cellular robotic system 'CEBOT' with genetic knowledge production algorithm. Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. DOI: 10.1109/ROBOT.1992.220269.
13. Thomas B. Sheridan. Adaptive Automation, Level of Automation, Allocation Authority, Supervisory Control, and Adaptive Control: Distinctions and Modes of Adaptation. 2011. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. DOI: 10.1109/TSMCA.2010.2093888
14. Scheepmaker, G.M., Pudney, P.J., Albrecht, A.R., Goverde, R.M.P., Howlett, P.G. Optimal running time supplement distribution in train schedules for energy-efficient train control. (2020) Journal of Rail Transport Planning and Management, 14, статья № 100180. DOI:10.1016/j.jrtpm.2020.100180.
15. Phalgun Madhusudan; DB Rathankumar; K Aishwarya; G S Anitha. Computationally Efficient Algorithms and High-Speed ASIC design for Railway Gate Automation. 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). DOI: 10.1109/ICCMC.2018.8488089.

### **Информация об авторах**

*Авдиенко Егор Геннадьевич* - аспирант, инженер кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, e-mail: [sleyter.ua@gmail.com](mailto:sleyter.ua@gmail.com)

### **Authors**

*Avdienko Egor Gennadyevich* - post-graduate student, engineer of the department "Rolling stock of electric railways", Omsk State University of Railways, Omsk, e-mail: [sleyter.ua@gmail.com](mailto:sleyter.ua@gmail.com)