

**В. Ю. Конюхов, Т. А. Опарина**

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТОКА СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**Аннотация.** Эффективное использование топливно-энергетических ресурсов является одной из важнейших задач, стоящих перед Правительством РФ. Федеральный закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», и стратегия развития России на период до 2030 года, определяют эффективность экономики одним из главных ориентиров долгосрочной государственной политики.

Железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей энергии в стране, потребляя около 5% электроэнергии и почти 11% дизельного топлива. В современных условиях энергоэффективность является важнейшим фактором повышения конкурентоспособности российских железных дорог на внутреннем и международном рынке транспортных услуг.

В настоящее время 85% общего объема железнодорожных перевозок осуществляется на электрической тяге. Большое внимание уделяется вопросу рационального использования электроэнергии и увеличения количества извлекаемой энергии - энергия не рассеивается напрасно, а возвращается в электросеть, экономя ресурсы.

Во-первых, для выхода на новый уровень развития транспортной инфраструктуры и повышения эффективности перевозок необходимы надежные энергосберегающие источники питания для железнодорожного транспорта.

В последние годы определенное восстановление железнодорожной сети достигло самого высокого уровня в истории России, а ее годовая пропускная способность превышает 12,7 миллиарда кВт·ч.

Экономическая ситуация определяет необходимость приобретения многих энергосберегающих технологий, некоторые из которых применяются в других отраслях промышленности и повседневной жизни. Среди этих технологий всем знакомое светодиодное освещение в настоящее время широко используется для освещения склада, железнодорожного вокзала, железнодорожного вокзала, пассажирского вагона и железнодорожной сигнализации. Во многих поездах потолок используется для внутреннего обустройства вагонов, что снижает энергопотребление освещения в 8 раз.

**Ключевые слова:** электроснабжение, железнодорожный транспорт, энергопоток, оптимизация электроснабжения, smartgrid.

**V.Yu. Konyukhov, T. A. Oparina**

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **OPTIMIZATION OF THE ENERGY FLOW OF THE RAILWAY TRANSPORT SYSTEM**

**Abstract.** Efficient use of fuel and energy resources is one of the most important tasks facing the Government of the Russian Federation. The Federal Law "On Energy Conservation and Energy Efficiency Improvement, and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation", and the development strategy of Russia for the period up to 2030, determine the efficiency of the economy as one of the main guidelines of long-term state policy.

Rail transport is one of the largest energy consumers in the country, consuming about 5% of electricity and almost 11% of diesel fuel. In modern conditions, energy efficiency is the most important factor in increasing the competitiveness of Russian railways in the domestic and international transport services market.

Currently, 85% of the total volume of rail transport is carried out by electric traction. Much attention is paid to the issue of rational use of electricity and increasing the amount of extracted energy - energy is not dissipated in vain, but returns to the power grid, saving resources.

Firstly, reliable energy-saving power supplies for railway transport are needed to reach a new level of development of transport infrastructure and increase the efficiency of transportation.

In recent years, a certain restoration of the railway network has reached the highest level in the history of Russia, and its annual capacity exceeds 12.7 billion kWh.

The economic situation determines the need to purchase many energy-saving technologies, some of which are used in other industries and everyday life. Among these technologies, the well-known LED lighting is currently widely used to illuminate a warehouse, a railway station, a railway station, a passenger car and a railway alarm system. In

*many trains, the ceiling is used for the internal arrangement of cars, which reduces the energy consumption of lighting by 8 times.*

**Keywords:** *power supply, railway transport, energy flow, optimization of power supply, smartgrid.*

## **Введение**

Транспортные системы считаются крупными потребителями энергии, на долю которых приходится 31,8 % общего потребления энергии и 1160,2 млн тонн выбросов CO<sub>2</sub> в Европе только в 2012 году [1]. В рамках этого на долю железнодорожного транспорта приходилось 2% общего потребления энергии и 7 миллионов тонн выбросов CO<sub>2</sub>. За тот же год в Хорватии было потрачено 164,5 ГВт·ч на перевозку около 27,6 млн пассажиров и 11 млн тонн грузов по железнодорожной системе [2]. Учитывая цели Европейского союза в области климата и энергетики на 2020 год, также известные как план 20-20-20, становится важным повысить энергоэффективность железнодорожных систем и продвигать на рынок “зеленый образ” железнодорожных приложений. Достижения в области информационно-коммуникационных технологий и электроники, наряду с более эффективными и экономически доступными системами хранения энергии, дают возможность сложным техническим системам, таким как железнодорожный транспорт, превратиться из пассивных нагрузок, потребляющих энергию из сети, в более активные объекты, способные адаптироваться к меняющимся условиям энергообмена и различным требованиям окружающей среды.

Чтобы повысить энергоэффективность железнодорожной системы, значительные усилия затрачиваются на лучшее использование и эффективность регенеративной энергии тормозных поездов [3-8]. Электропоезда при разрыве преобразуют механическую кинетическую энергию в электрическую и подают ее обратно в цепную сеть [9-13]. Если другой поезд ускоряется, питаясь от той же подстанции, энергия, направленная обратно в цепную сеть, будет использоваться для обеспечения его ускорения. Если поблизости нет ускоряющихся поездов, регенерированная энергия вызывает перенапряжение, которое потенциально повреждает инфраструктуру системы. Затем энергия рассеивается на встроенных в поезд резисторах или накапливается в устройствах хранения энергии, если таковые имеются. Предоставляется возможность настраивать расписание поездов с целью тесной координации близлежащих поездов таким образом, чтобы рекуперативная энергия тормозящих поездов немедленно использовалась ускоряющимися поездами [3, 4]. Внедрение бортовых и стационарных систем накопления энергии [5-13] для хранения энергии рекуперативного торможения для последующего использования показывает, что экономия до 30% рекуперативной энергии достижима. Для дальнейшего увеличения экономических эффектов, связанных с энергетическими потоками железнодорожной системы, необходимо внедрить систему управления более высокого уровня, чтобы учитывать возможность различных цен на электроэнергию в течение дня или изменения приемлемых уровней обмена энергией, установленных энергокомпаниями.

Концепция микросетей позволила динамически оптимизировать общее энергопотребление железнодорожной системы с помощью распределенного рекуперативного торможения, возобновляемых источников энергии и хранилищ, что превращает ее в активного участника энергосистемы [8, 9]. Четкая структура микрорешетки может быть сформирована для каждой подстанции питания железнодорожной системы, где тормозные поезда представляют собой распределенные источники, а системы накопления энергии установлены на подстанции. Система управления энергопотреблением microgrid балансирует потоки энергии между ускоряющимся потреблением энергии поездами, замедляющимся производством энергии поездами, накоплением энергии и обменом энергией с сетью. Он учитывает заявленный профиль цен на энергообмен на стороне сети, текущее состояние хранилища энергии и прогнозирование энергопотребления поездов, а также принимает решение, когда покупать / продавать электрическую энергию из / в коммунальную сеть и в каком количестве. Поэтому каждая питающая подстанция вдоль маршрута поезда может наблюдаться как отдельная микросеть. Делая еще один шаг вперед, система железнодорожного движения рассматривается как цепочка микросетей, которые могут быть скоординированы для достижения минимальных затрат на энергию, потребляемую из сети, в то время как все поезда работают в соответствии с расписанием и эксплуатационными ограничениями на маршрутах.

Предыдущая работа по оптимизации потока энергии микрорешетки выполнена на микрорешетке постоянного тока, которая состоит из фотоэлектрической матрицы, блока батарей и блока топливных элементов с электролизером, подключенных к сети через двунаправленный преобразователь мощности. Минимизация эксплуатационных расходов микрорешетки формулируется с помощью линейной программы, которая учитывает эффективность заряда и разряда устройств хранения энергии [14, 15].

Повышение эффективности энергопотребления имеет дополнительные преимущества для оператора железной дороги и энергосистемы в целом:

- использование сети более эффективно и требуется меньшая мощность;
- оператор железной дороги становится менее зависимым от энергосистемы;
- децентрализация энергосистемы, что повышает ее надежность и стабильность;
- наконец, количество энергии, которое необходимо сократить, сокращается, а эксплуатационные расходы еще больше снижаются [4].

В этой статье рассматривается микросеть железнодорожной системы, состоящая из гибридной системы накопления энергии, распределенной генерации близлежащих поездов в режиме прерывания и двунаправленного подключения к электросети через питающую подстанцию. Задача оптимизации потока энергии микрорешетки определена как линейная программа (LP) и реализована схема модельного прогнозирующего управления (MPC) с философией отступающего горизонта. Эффективность предлагаемого подхода проверяется на однодневном сценарии моделирования с учетом различных длин горизонта прогнозирования.

### Модель микрорешетки

Модель микросети, представленная на рис. 1, рассматривается с точки зрения балансировки потоков энергии между ускоряющимися и замедляющимися поездами, гибридной системой накопления энергии и станцией снабжения, подключенной к коммунальной сети с переменной ценой на энергию. Рассматривая иерархическую конструкцию управления микросетями, основное внимание здесь уделяется высокоуровневой оптимизации потоков энергии, в то время как стабильность напряжения и качество электроэнергии контролируются на более низких уровнях управления [15].

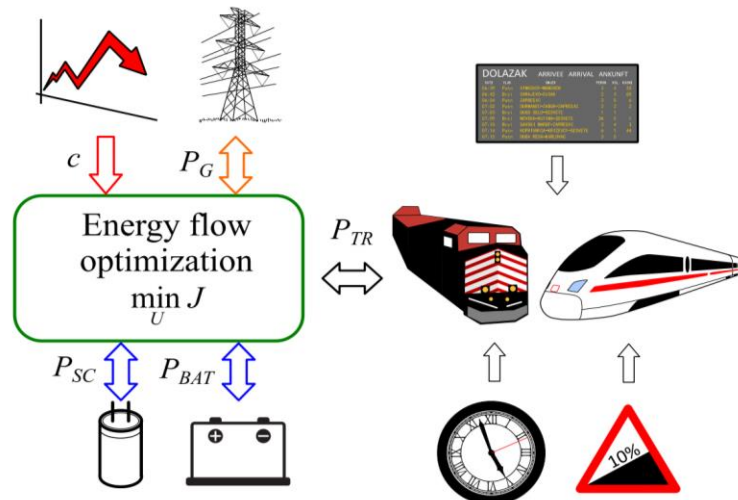


Рис. 1 – Иллюстрация задачи оптимизации потока энергии

### Системы хранения энергии

Система хранения энергии Microgrid выбрана в качестве гибридной системы хранения, состоящей из суперконденсаторов и батарей. Использование гибридных накопителей обеспечивает гибкость хранения, где использование суперконденсаторов имеет важное значение для улавливания высокой плотности мощности и высокой частоты работы, связанной с рекуперативным торможением; использование батарей для поглощения этих коротких пиков энергии влечет за собой слишком большую систему и короткий жизненный цикл. С другой стороны, аккумуляторы характеризуются высокой плотностью энергии и способностью обеспечивать хранение в течение более длительного периода времени. Гибридное решение - это разумный баланс между двумя [5], [6], [10].

### Тяговая мощность поезда

Профиль тягового усилия поезда PTR получен как предварительно вычисленное решение задачи оптимизации, представленной в [16-20], где профиль энергопотребления поездов на маршруте был минимизирован с учетом расписания, ограничений маршрута (ограничения скорости, границы силы тяги поезда) и комфорта пассажиров. Задача оптимального управления поездом была решена для поездок продолжительностью 5, 10 и 15 минут (между двумя соседними станциями), и решения объединены для формирования вектора оптимального профиля энергопотребления для каждого 15-секундного момента времени в течение следующих 24 часов. Примерные профили потребления пас-

сажирских поездов на маршруте для 5, 10 и 15 минут времени в пути между двумя станциями представлены на рис. 2.

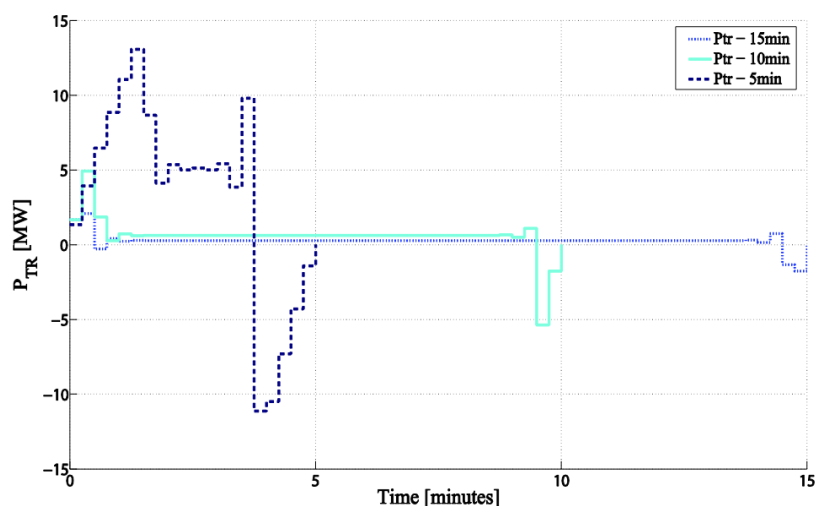


Рис. 2 – Профили потребления поездов между двумя станциями

### Оптимизация потока энергии

Вводится схема модельного прогнозирующего управления (МРС) [21] с философией отступающего горизонта для управления с замкнутым контуром. В рамках ПДК, оптимальная последовательность контроля  $u^*$  для прогнозирования  $N$  горизонта вычисляется по времени  $t = 0$ , решая проблему энергии для оптимизации потока для начального состояния системы  $x_0 = x(t)$ . В философии отступающего горизонта реализуется только первое управляющее воздействие  $u(t) = u_0^*$ , и система переходит в состояние в момент времени  $t + 1$ , где задача оптимизации снова решается для вновь определенных обстоятельств. Задача оптимизации использует модель системы, сформулированную для моделирования поведения системы на горизонте прогнозирования. Из-за неточности модели или различных помех, которые могут воздействовать на систему в течение этого времени, оптимальная последовательность управления снова пересчитывается в момент времени  $t + 1$ , чтобы компенсировать любое непредсказуемое поведение системы. Путем пересчета оптимальной последовательности управления в каждый момент времени  $t$  со всей доступной в настоящее время информацией о ценах и потреблении и реализации только первого вектора управления вводится обратная связь через состояния системы  $x(t)$ .

Эффективность предлагаемого подхода в этой статье проверяется с помощью сценария моделирования, основанного на фактических данных о ценах на, профилях потребления поездов, полученных из задачи оптимизации, представленной в [21], и модели гибридной системы хранения энергии, состоящей из суперконденсаторов и батарейки. Система моделируется с шагом по времени  $\Delta T$ , равным 15 секундам, и оптимальные потоки энергии рассчитываются на период в 24 часа, поскольку цены на энергоносители обычно указываются на один день вперед. Процедура изучается для различных длин горизонта прогнозирования  $N$ .

Оптимизации, выполняемые с более короткими горизонтами прогнозирования, превосходят оптимизации с более длинными горизонтами прогнозирования из-за того факта, что алгоритм управления способен находить самые высокие цены за более длительный период времени и, следовательно, лучше использовать накопленную энергию, разряжая систему хранения во время самой высокой цены на горизонте. Хотя ожидалось, что наилучшие показатели будут получены при  $N=24$  ч, из-за специфических профилей цены и потребления наилучшие результаты получены при  $N=6$  ч.

Накопитель энергии разряжается при низких ценах на электроэнергию и заряжается при высоких ценах на электроэнергию. Показано, что из-за ограничения мощности, которая может быть экспортирована в сеть, суперконденсаторы в основном заряжаются во время торможения поездов, чтобы использовать энергию рекуперативного торможения, что подтверждает выбор гибридных систем накопления энергии, поскольку батареи редко используются для хранения энергии рекуперативного торможения и лучше эксплуатируются для использования разницы в профиле цен на электроэнергию в течение дня.

Увеличение емкости накопителя энергии обеспечивает дальнейшее снижение эксплуатационных затрат, поскольку большая часть энергии рекуперативного торможения накапливается в накопи-

теле, а не рассеивается в резисторах. Однако увеличение емкости окажет значительное влияние на инвестиционные затраты на систему хранения. Чтобы найти оптимальную емкость системы хранения, необходимо провести анализ затрат и выгод с учетом инвестиционных затрат и снижения эксплуатационных расходов.

Железнодорожная система со встроенной микрорешеткой восстановила 71 % энергии рекуперативного торможения. Дополнительное моделирование было выполнено с горизонтом прогнозирования  $N=6$  для измерения производительности системы управления при различных ограничениях на мощность, экспортируемую в сеть. Показано, что производительность системы управления по сравнению с поведением без микрорешетки снижается, когда в сеть может быть передано больше энергии рекуперативного торможения.

### **Заключение**

В данной статье представлена оптимизация энергопотока в железнодорожной системе с интегрированной микрорешеткой. Реализована схема прогнозирующего управления моделью, и подход проверен для различных длин горизонта прогнозирования в сценарии моделирования. Показано, что предлагаемый подход снижает эксплуатационные расходы железнодорожной системы за счет зарядки и разрядки гибридной системы хранения энергии с лучшей производительностью для более длительных горизонтов прогнозирования. Выбор систем накопления энергии обоснован, поскольку показано, что суперконденсаторы используются для накопления энергии рекуперативного торможения, в то время как батареи лучше используют разницу в профиле цен на электроэнергию в течение дня. Из-за присущей им сложности железнодорожная система контролируется с двух разных уровней управления. Представленная здесь оптимизация железнодорожной системы более высокого уровня оптимизирует потоки энергии в зависимости от условий внешней сети, состояния системы хранения энергии и железнодорожного движения. Оптимизация более низкого уровня потребления, при которой каждый поезд управляется для достижения наименьших затрат на проезд при сохранении расписания и комфорта пассажиров, может быть пересчитана таким образом, чтобы учитывалось взаимодействие обоих уровней, а вычисленный профиль энергопотребления на более низком уровне напрямую максимизирует глобальную экономическую выгоду от работы всей системы. Цена обмена энергией с сетью указана для отдельного поезда, преобразованного через систему более высокой координации, а экономические затраты снижаются за счет совместных действий всех поездов по балансировке потоков энергии.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Publications Office of the European Union, European Commission. EU Transport in figures: Statistical pocketbook 2014. Luxembourg, 2014.
2. "Annual energy report – Energy in Croatia 2013", Republic of Croatia, Ministry of economy, December 2014., Zagreb
3. X. Sun, H. Cai, X. Hou, M. Zhang and H. Dong, "Regenerative Braking Energy Utilization by Multi Train Cooperation," Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on, pp.139-144, Oct. 2014.
4. S. Su, T. Tang, C. Roberts and L. Huang, "Cooperative train control for energy-saving," Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2013 IEEE International Conference on, pp.7-12, Aug. 2013.
5. S. de la Torre, A. J. Sanchez-Racero, J. A. Aguado, M. Reyes and O. Martinez, "Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railways Systems," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 30, no. 3, pp. 1492-1500 May 2015.
6. S. Nasr, M. Iordache and M. Petit, "Smart micro-grid integration in DC railway systems," Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES, pp. 12-15 Oct. 2014.
7. T. Ratniyomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways," Electrical Systems in Transportation, IET, pp. 9-20 March 2014.
8. V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber and A. Piccolo, "Siting and sizing of stationary Super-Capacitors in a Metro Network," AEIT Annual Conference, 2013, pp. 3- 5 Oct. 2013.

9. DEVELOPMENT OF THE PERFORMANCE CONTROL ALGORITHM OF THE BLOWER MOTORS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES FOR VARIOUS OPERATING MODES // Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Shtayger M.G., Karlina A.I. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020). 2021. С. 012001.

10. INCREASE OF THE THROUGHPUT AND PROCESSING CAPACITY OF THE RAILWAY LINE MOUNTAIN PASS SECTION BY STRENGTHENING THE DEVICES OF THE SYSTEM OF TRACTION POWER SUPPLY // Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Shtayger M.G., Karlina A.I. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020). 2021. С. 012005.

11. EVALUATION OF THE COMPATIBILITY OF THE POWER TRACTION SUPPLY SYSTEM WITH A USE OF A "VIRTUAL COUPLING" TECHNOLOGY // Olentsevich V.A., Astashkov N.P., Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Shtayger M.G., Karlina A.I. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021" 2021. С. 012112.

12. A TECHNICAL SOLUTION FOR INCREASING THE RELIABILITY OF THE PHASE-SPLITTERS OF AC ELECTRIC LOCOMOTIVES // Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Kuznetsov B.O., Karlina Y.I., Kuznetsova N.A. В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021" 2021. С. 012011.

13. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ АКТИВАМИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ // Карлина Ю.И., Дворянский Ю.В. В сборнике: Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2021. С. 179-184.

14. M. Gulin, J. Matuško and M. Vašak, "Stochastic model predictive control for optimal economic operation of a residential DC microgrid," Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on, pp.505-510 March 2015.

15. M. Gulin, M. Vašak and M. Baotić, "Analysis of microgrid power flow optimization with consideration of residual storages state," Proceedings of the 2015 European Control Conference, Austria, pp. 3131-3136.

16. M. Vašak, M. Baotić, N. Perić, and M. Bago, "Optimal rail route energy management under constraints and fixed arrival time," in Proceedings of the European Control Conference, 2009, pp. 2972–2977.

17. ПРИВЕДЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ СИЛ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ // Карлина А.И., Каргапольцев С.К., Гозбенко В.Е. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 175-179.

18. ALGORITHM OF CURRENT PROTECTION BASED ON THREE INSTANTANEOUS-VALUE SAMPLES // Buryanina N., Korolyuk Yu., Koryakina M., Lesnykh E., Suslov K. В сборнике: Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe). electronic edition. 2019.

19. M. Vašak, M. Baotić, M. Bago, and N. Perić, "Constrained energy optimal control of trains: Conceptual implementation," in 30th Conference on Transportation Systems with International Participation Automation in Transportation, 2010, pp. 143–146.

20. Hrvoje Novak, Mario Vašak, Marko Gulin, Vinko Lesic. Railway transport system energy flow optimization with integrated microgrid // 12th International Conference on Modern Electrified Transport MET 2015., Trogir, Croatia, 4-7th October 2015, Trogir, Croatia.

21. J. B. Rawlings and D. Q. Mayne, Model Predictive Control: Theory and Design, 1st ed. Nob Hill Publishing, 2009.

## REFERENCES

1. Publishing Office of the European Union, European Commission. EU transport in numbers: A Statistical handbook for 2014. Luxembourg, 2014.
2. "Annual Report on Energy – Energy in Croatia for 2013", Republic of Croatia, Ministry of Economy, December 2014, Zagreb
3. X. Song, H. Tsai, X. Hou, M. Zhang and H. Dong, "The use of regenerative braking energy in the interaction of several trains", Intelligent Transport Systems (ITSC), 17th IEEE International Conference 2014, pp.139-144, October 2014.
4. S. Su, T. Tan, K. Roberts and L. Huang, "Joint Train Management for Energy saving", Intelligent Rail Transport (ICIRT), IEEE International Conference 2013, pp.7-12, August 2013.
5. S. de la Torre, A. J. Sanchez-Racero, J. A. Aguado, M. Reyes and O. Martinez, "Optimal energy storage size for regenerative braking in electric railway systems", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume 30, No. 3, pp. 1492-1500 May 2015.
6. S. Nasr, M. Iordash and M. Petit, "Intelligent integration of microgrids in DC railway systems", European Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT-Europe), 2014 IEEE PES, pp. 12-15 October 2014.
7. T. Ratniomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices on electrified railways", "Electrical systems in transport", IET, pp. 9-20 March 2014.
8. V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber and A. Piccolo, "Placement and sizing of stationary supercapacitors in the metro network", AEIT Annual Conference, 2013, pp. 3-5 October 2013.
9. DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR CONTROLLING THE PERFORMANCE OF ELECTRIC LOCOMOTIVE FAN MOTORS FOR VARIOUS OPERATING MODES // Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Steiger M.G., Karlina A.I. In the collection: IOP Conference Series: Materials Science and Technology. International Conference: Topical Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020). 2021. p. 012001.
10. INCREASING THE THROUGHPUT AND THROUGHPUT CAPACITY OF THE MOUNTAIN PASS SECTION OF THE RAILWAY LINE BY STRENGTHENING THE DEVICES OF THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM // Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Steiger M.G., Karlina A.I. In the collection: IOP conference series: Materials Science and Engineering. International Conference: Topical Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020). 2021. p. 012005.
11. EVALUATION OF THE COMPATIBILITY OF THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM USING THE "VIRTUAL COUPLING" TECHNOLOGY // Olentsevich V.A., Astashkov N.P., Akhmetshin A.R., Suslov K.V., Steiger M.G., Karlina A.I. In the collection: Physical journal: A series of conferences. Ser. "International conference on topical issues of mechanical engineering, AIME 2021" 2021. p. 012112.
12. TECHNICAL SOLUTION FOR INCREASING THE RELIABILITY OF PHASE SEPARATORS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES OF ALTERNATING CURRENT // Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Kuznetsov B.O., Karlina Yu.I., Kuznetsova N.A. In the collection: Physical Journal: Materials of the conference. Ser. "International Conference on Topical issues of Mechanical Engineering, AIME 2021" 2021. p. 012011.
13. METHODOLOGICAL SUPPORT FOR THE MANAGEMENT OF PRODUCTION ASSETS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY // Karlina Yu.I., Dvoryansky Yu.V. In the collection: Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 2021. pp. 179-184.
14. M. Gulin, Ya. Matushko and M. Vashak, "Predictive control of a stochastic model for optimal economic operation of a DC microlattice in residential premises", Industrial Technology (ICIT), IEEE International Conference 2015, pp.505-510 March 2015.
15. M. Gulin, M. Vashak and M. Baotic, "Analysis of the optimization of the energy flow of the microgrid taking into account the state of residual storage", Proceedings of the European Control Conference 2015, Austria, pp. 3131-3136.

16. M. Vashak, M. Baotic, N. Perich and M. Bago, “Optimal management of energy consumption of a railway route under restrictions and fixed arrival time”, in Proceedings of the European Control Conference, 2009, pp. 2972-2977.

17. REDUCTION OF GENERALIZED FORCES IN MATHEMATICAL MODELS OF TRANSPORT SYSTEMS // Karlina A.I., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No. 3 (51). pp. 175-179.

18. ALGORITHM OF CURRENT PROTECTION BASED ON THREE SAMPLES OF INSTANTANEOUS VALUE // Buryanina N., Korolyuk Yu., Koryakina M., Lesnykh E., Suslov K. In the collection: Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2019 (ISGT-Europe) conference. electronic edition. 2019.

19. M. Vashak, M. Baotic, M. Bago and N. Perich, “Optimal control of trains with limited energy: conceptual implementation”, at the 30th Conference on Transport Systems with International Participation Automation in Transport, 2010, pp. 143-146.

20. Hrvoje Novak, Mario Vashak, Marko Gulin, Vinko Lesic. Optimization of the energy flow of the railway transport system using an integrated microgrid // 12th International Conference on Modern Electrified Transport MET 2015., Trogir, Croatia, October 4-7, 2015, Trogir, Croatia.

21. J. B. Rawlings and D. K. Main, Predictive control model: Theory and design, 1st ed. Nob Hill Publishing House, 2009.

### **Информация об авторах**

*Конюхов Владимир Юрьевич* – к. т. н., профессор, профессор кафедры «Автоматизации и управления», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: konyuhovvy@ex.istu.edu

*Опарина Татьяна Александровна* – магистрант, гр. ЭУМ-20-1 кафедры «Электроснабжения и электротехники», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: martusina2@yandex.ru

### **Information about the authors**

*Konyukhov Vladimir Yuryevich* – Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: konyuhovvy@ex.istu.edu

*Oparina Tatiana Alexandrovna* – Master's student, gr. EUm-20-1 of the Department of "Power Supply and Electrical Engineering", Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: martusina2@yandex.ru