

УДК 629.423.2

Организация эксплуатации электропоездов метрополитена «НеВа» с учетом возможности импортозамещения системы управления

И. И. Лапсарь, А. Е. Цаплин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Лапсарь И. И., Цаплин А. Е. Организация эксплуатации электропоездов метрополитена «НеВа» с учетом возможности импортозамещения системы управления // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 127–134. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-127-134

Аннотация

Цель: Произвести анализ отказов вагонного оборудования состава проекта «НеВа» по данным электродепо метрополитена «Невское»; обосновать преимущества метода векторного управления двигателями над частотным управлением; выявить импортное оборудование электропоезда «НеВа» и на основе анализа эксплуатационных отказов вагонного оборудования разработать рекомендации по импортозамещению системы управления электропоезда метрополитена «НеВа» для обеспечения бесперебойных и безопасных перевозок пассажиров Петербургского метрополитена; провести сравнительный анализ импортных и отечественных компонентов для реализации системы управления тяговыми двигателями электропоезда метрополитена «НеВа». **Методы:** Анализ отказов вагонного оборудования состава проекта «НеВа» на основе эксплуатации по данным электродепо метрополитена «Невское». Выявление проблемных узлов на основе анализа отказов вагонного оборудования. Поиск отечественного аналога импортного оборудования. Проведение сравнения характеристик отечественных и импортных микроконтроллеров. **Результаты:** Обоснованы преимущества метода векторного управления тяговыми двигателями над традиционным методом частотного регулирования. Разработаны рекомендации по выбору отечественных аналогов импортного оборудования системы управления электропоезда метрополитена «НеВа». **Практическая значимость:** Приведенные отечественные аналоги импортного оборудования позволяют организовать бесперебойный процесс эксплуатации электропоездов метрополитена «НеВа», а микроконтроллер K1921BK01T может стать основой в вопросе импортозамещения компонентов вагонов «НеВа».

Ключевые слова: Импортозамещение, электропоезд «НеВа», система управления, анализ, микроконтроллер, векторное управление.

Введение

Обеспечение безопасных перевозок пассажиров является главной задачей ГУП «Петербургский метрополитен».

Появление составов «НеВа» неслучайно называют новой, очень значимой вехой в развитии ГУП «Петербургский метрополитен».

В 2012 г. дан старт переходу от подвижного состава с реостатно-контакторной системой управления (проекты и разработки середины XX в.) к абсолютно новым поездам, на которых применен современный принцип управления тяговыми электродвигателями. Главными отличиями новых составов стали значительная экономия электроэнергии на тягу поездов и повышенный уровень комфорта пассажиров, в том числе маломобильных, и машинистов, а также серьезные преимущества в эксплуатации и содержании оборудования [1].

Сегодня доля поездов с асинхронным тяговым приводом в парке подвижного состава Петербургского метрополитена составляет 908 вагонов, из которых 144 вагона (24 шестивагонных поезда) — «НеВа».

В настоящий момент в инвентарном парке электродепо «Невское» насчитывается 24 состава 6-вагонного формирования проекта «НеВа»:

- 9 составов 81-556/557/558;
- 8 составов 81-556.1/557.1/558.1;
- 7 составов 81-556.2/557.2/558.2 [2].

Производителем составов является ООО «ВАГОНМАШ» (РФ, Санкт-Петербург), партнером при производстве данных составов являлась чешская кампания Škoda Transportation, в связи с чем до 70 % основных компонентов, оборудования и узлов данного состава являются импортными. Основные фирмы — поставщики оборудования представлены в табл. 1 [3].

ТАБЛИЦА 1. Импортное оборудование на вагонах проекта «НеВа»

№ п/п	Наименование (модель)	Производитель	Страна	Модификации вагона
1	Тяговый двигатель MLU 3839 K/4	Škoda Eelectric	Чехия	Все модификации
2	Токоприемник SG112	Stemann-Technik GmbH	Германия	Все модификации
3	Тяговый контейнер 8МКМ-1,2	Škoda Eelectric	Чехия	81-556/557/558
4	Тяговый контейнер 8МКМ-3,4	Škoda Eelectric	Чехия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
5	Кондиционер кабины HVAC 3404	Konvekta AG	Германия	Все модификации
6	Система вентиляции вагонов MET-HV-SP	Thermo Kong	Бельгия	Все модификации
7	Аккумуляторные батареи MRX	SAFT	Франция	Все модификации
8	Замки торцевых дверей	ABLOY	Финляндия	81-556/557/558, 81-556.1/557.1/558.1
9	Замки торцевых дверей	S&S	Германия	81-556.2/557.2/558.2
10	Пневморессора	GMT	Германия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
11	Пневморессора	SEK	Германия	81-556/557/558
12	Гасители колебаний	KONI	Голландия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
13	Муфта пластинчатая	KWD	Германия	Все модификации
14	Тормозное оборудование	Knorr-Bremse	Германия	Все модификации
15	Реле пневматическое (панели автостопа)	SMC Corporation	Япония	Все модификации
16	Система управления	UniControls (Škoda)	Чехия	81-556/557/558
17	Система управления	Lokel	Чехия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2
18	Система автоведения АТО-100	UniControls (Škoda)	Чехия	81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2

В условиях санкционной политики недружественных государств поставки большинства импортных компонентов для подвижного состава проекта «НеВа» в Россию прекращены. Это делает невозможным как ремонт составов при отказах оборудования, так и проведение планово-предупредительных ремонтов по достижении максимально допустимых межремонтных пробегов [4].

Для обеспечения устойчивого функционирования в условиях санкций Петербургскому метрополитену, как и любому предприятию, необходимо снизить зависимость от иностранных поставок [5]. Решением становится импортозамещение — замена зарубежной продукции отечественными аналогами. Это позволит:

- обслуживать и ремонтировать составы проекта «НеВа» в соответствии с установленными требованиями;
 - обеспечить независимость от поставок из недружественных государств.
- С 2022 г. по этому направлению ведется активная работа.

Анализ отказов

Для подготовки предложений по проведению импортозамещения составов проекта «НеВа» необходимо изначально провести анализ отказов вагонного оборудования.

По результатам выявлены следующие «проблемные узлы»:

- тяговый привод;
- торцевые двери;
- механическое оборудование раздвижных дверей;
- система верхнего уровня.

По результатам анализа отказов выявлено, что торцевые двери, напрямую подключенные к системе управления (обеспечивающие выдачу сигналов на разблокировку/блокировку, а также передачу диагностических сообщений), являются критическим оборудованием для поддержания работоспособности вагонов проекта «НеВа». В связи с этим в дальнейшем будет рассмотрена модернизация системы управления.

Система управления представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для изменения режимов работы объекта регулирования с целью обеспечения заданных параметров функционирования.

В контексте подвижного состава система управления позволяет автоматизировать ключевые процессы ведения поезда, включая:

- начало движения;
- выбор режима хода на перегоне;
- выполнение торможения [6].

Особенности и преимущества метода векторного управления

Сравнение традиционного метода частотного регулирования и векторного регулирования представлено в табл. 2. **Ключевое преимущество** векторного управления — существенно более быстрый отклик на изменение момента: как

ТАБЛИЦА 2. Сравнение векторного управления и частотного регулирования

Параметр	Частотное регулирование	Векторное управление
Управление напряжением	Величина, частота	Величина, частота, фаза
Управлением током	Управление действующим значением	Независимое регулирование током момента и током возбуждения
Реакция на изменение момента	Несколько сотен мс	Несколько десятков мс
Объем вычисления ЦП	Небольшой	Большой

минимум в 10 раз выше по сравнению с частотным методом. Векторное управление контролирует не только значение и частоту напряжения (регулируемые в методе частотного регулирования), но и фазу. При этом возникает возможность независимого регулирования тока возбуждения и тока момента, более того, ток момента регулируется быстро и с высокой точностью [7].

Использование метода векторного управления для железнодорожного подвижного состава позволит достичь:

- следящего управление восстановлением сцепления при юзе/боксованиях;
- увеличения рекуперируемой энергии при снижении нагрузки сети питания;
- повышения комфортности движения за счет снижения резких изменений момента;
- высокой точности поддержания постоянной скорости движения при использовании систем автovedения поезда.

Техническая реализация

Анализ рынка радиоэлектронных элементов показал, что развитие современных систем векторного управления получило существенный импульс благодаря применению специализированного оборудования — в частности, интегральных схем. Первые системы управления асинхронными машинами работали на принципах жесткой логики. Также широкое применение получили программируемые логические интегральные схемы.

Принципы жесткой логики в векторном управлении были реализованы на аппаратном уровне управляющего устройства и адаптированы под конкретный тип привода. Отсутствие собственных вычислительных мощностей требовало от системы управления электроприводом наличия дополнительных устройств для вычислений и контроля работы привода. Один из лидеров по производству подобной продукции — американская компания International Rectifier (IR), известная благодаря своей линейке микроконтроллеров IRMCK.

Новое поколение микроконтроллеров для управления асинхронными электрическими приводами представляет собой комбинацию управляющего микропроцессора и аппаратного устройства для векторного управления. Такие устройства представлены на рынке и чаще всего изготавливаются на базе ядра MSC51 [8].

Одним из ключевых преимуществ данного технического решения в области векторного управления является отсутствие необходимости во внешних вычислительных мощностях: расчеты выполняются аппаратно под управлением микроконтроллера. Однако стоит отметить, что данный тип микроконтроллеров обладает низкой адаптивностью, то есть применение продукции, разработанной под определенный тип двигателей, для других машин не представляется возможным. Подобные устройства выпускаются компанией IR в серии IRMCF 312, а также представлены в ряде линеек продукции Toshiba.

До 2013 г. были предприняты попытки создать универсальное устройство, но существующие возможности не позволяли добиться желаемого результата. Однако в 2013 г. американской компанией Texas Instruments (TI) было предложено инновационное решение — отказ от аппаратной логики в пользу полностью программного алгоритма управления на базе микроконтроллера общего назначения [9].

Ниже представлен сравнительный анализ технических характеристик отечественного микроконтроллера K1921BK01T (производство — АО «НИИЭТ») и зарубежных аналогов (табл. 3).

По результатам проведенного сравнительного анализа можно сделать следующий вывод: с учетом характеристик продукции производства АО «НИИЭТ» не уступает импортным аналогам, а в некоторых параметрах и превосходит их.

ТАБЛИЦА 3. Сравнительный анализ характеристик микроконтроллеров

	K1921BK01T НИИЭТ (Россия)	STM32F423VH SMT	TMS320F28335 TI
Производительность	100 МГц	100 МГц	150 МГц
ШИМ (широко-импульсная модуляция)	18 каналов	6 каналов + 12 доп.	12 каналов
АЦП (аналого-цифровой преобразователь)	23 канала, 12 «медленных»	16 каналов, 1 «быстрый»	12 каналов, 1 «быстрый»
QEP (квадратур. блок)	2	1 (совмещен с ШИМ)	2
Блок захвата САР	6	N (совмещен с ШИМ)	6
SPI/12C/UART/CAN	4 / 2 / 4 / 2	5 / 4 / 10 / 3	3 / 1 / 3 / 2
ЦАП	нет	2	нет
ОЗУ	192 Кбайт	320 Кбайт	68 Кбайт
Flash	1024 Кбайт	1,5 Мб	512 Кбайт
Польз. память	64 Кбайт	нет	нет
USB	1	1	нет
Ethernet	1	нет	нет
Часы	1	1	нет

Заключение

На основании проведенного анализа технических характеристик импортных и отечественных микроконтроллеров, а также с учетом действующих санкционных ограничений, можно сделать вывод о реальной возможности разработки полностью отечественной системы управления на базе рассмотренных технических компонентов.

Особую значимость в контексте импортозамещения имеет микроконтроллер K1921BK01T (производство АО «НИИЭТ»). Его технические характеристики и функциональные возможности позволяют рассматривать данное изделие в качестве ключевой элементной базы для модернизации компонентов вагонов «НеВа».

Список источников

1. Шлендов И. А. «НеВа» отметила 10летний юбилей / И. А. Шлендов, М. Макалатия, Ю. Румянцев // Газета «Петербургский метрополитен». 21.06.2023. № 10(1755).
2. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/НеВа> (дата обращения: 15.09.2025).
3. Перечень производителей оборудования вагонов состава «Нева» моделей 81-556/557/558. 556.00.00.000 ПП. ООО «Вагонмаш». — СПб., 2014. — 11 с.
4. Правила текущего содержания и ремонта подвижного состава Петербургского метрополитена, введенные в действие приказом начальника метрополитена от 28.02.2022 № 253. — 62 с.
5. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Импортозамещение> (дата обращения: 15.09.2025)
6. Вагоны метрополитена моделей 81-556, 81-557, 81-558. Руководство по эксплуатации. Общая часть 556.00.00.000-01 РЭ. 2014. — 85 с.
7. Векторное управление тягового инвертора. Система тяги для метрополитена Санкт-Петербурга. Hitachi, ltd. — 2015. — 16 с.
8. URL: http://www.compel.ru/lib/ne/2008/18/4-konfiguriruemye_kontrolleryi-elektroprivoda-serii-irmck/ (дата обращения: 22.09.2025).
9. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=148398> (дата обращения: 01.10.2025)

Дата поступления: 14.07.2025

Решение о публикации: 04.08.2025

Контактная информация:

ЛАПСАРЬ Ирина Игоревна — магистрант; irisha-zaichena@yandex.ru

ЦАПЛИН Алексей Евгеньевич — канд. техн. наук, доц.; tsaplin.alexey@mail.ru

Management of the “NeVa” Metro Train Operation, with the Potential of Import Substitution of the Control System

I. I. Lapsar¹, A. E. Tsaplin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Lapsar' I. I., Tsaplin A. E. Management of the “NeVa” Metro Train Operation, with the Potential of Import Substitution of the Control System. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 127–134. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-127-134

Summary

Purpose: To analyse the equipment failures of the “NeVa” train cars utilizing data from the Nevskoye Metro depot. To establish the benefits of vector motor control in comparison to frequency control. To identify the imported equipment of the “NeVa” electric train, and to develop recommendations for substituting these imports in the train’s control system based on an analysis of the failures that occurred during operation, aiming to ensure the uninterrupted and safe transportation of passengers within the St. Petersburg Metro system. Additionally, a comparative analysis of imported components versus domestic ones will be conducted to facilitate the implementation of the traction motor control system for the “NeVa” electric train. **Methods:** Analysis of the “NeVa” train equipment failures utilizing operational data from the Nevskoye Metro depot. Identification of faulty elements by reviewing of train equipment malfunctions. Investigation of domestic alternatives to imported equipment. A comparison of the specifications for both domestic and imported microcontrollers. **Results:** The benefits of vector control for traction motors compared to conventional frequency control have been clearly established. Guidelines for choosing domestic alternatives to imported control system equipment for the “NeVa” electric train have been formulated. **Practical significance:** The domestic substitutes for imported equipment outlined in this paper will facilitate the efficient operation of the “NeVa” Metro electric trains, and the K1921VK01T microcontroller has the potential to serve as a foundation for import substitution of the “NeVa” train components.

Keywords: Import substitution, “NeVa” electric train, control system, analysis, microcontroller, vector control.

References

1. Shlendov I. A., Makalatiya M., Rumyantsev Yu. “NeVa” otmetila 10letniy yubilej [“NeVa” Celebrated Its 10th Anniversary]. *Gazeta “Peterburgskiy metropolitana”* [Petersburg Metro Newspaper]. June 21, 2023, № 10(1755).
2. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/NeVa> (accessed: September 15, 2025).
3. Perechen’ proizvoditeley oborudovaniya vagonov sostava “Neva” modeley 81-556/557/558. 556.00.00.000 III. OOO “Vagonmash” [List of manufacturers of equipment for Neva train cars, models 81-556/557/558. 556.00.00.000 PP. Vagonmash LLC]. St. Petersburg, 2014, 11 p.
4. Pravila tekushchego soderzhaniya i remonta podvizhnogo sostava Peterburgskogo metropolitena, vvedennye v deystvie prikazom nachal’nika metropolitena ot 28.02.2022 № 253 [Rules for the Routine Maintenance and Repair of Rolling Stock of the St. Petersburg Metro, put into effect by Order № 253 of the Head of the Metro dated February 28, 2022]. 62 p.
5. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Importozameshchenie> (accessed: September 15, 2025).

6. *Vagonny metropolitena modeley 81-556, 81-557, 81-558. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Obshchaya chast' 556.00.00.000-01 RE. 2014* [Metro Cars Models 81-556, 81-557, and 81-558. Operating Manual. General Part 556.00.00.000-01 RE. 2014]. 85 p.
7. *Vektornoe upravlenie tyagovogo invertora. Sistema tyagi dlya metropolitena Sankt-Peterburga. Hitachi, ltd* [Vector Control of the Traction Inverter. Traction System for the St. Petersburg Metro. Hitachi, Ltd]. 2015, 16 p.
8. Available at: http://www.compel.ru/lib/ne/2008/18/4-konfiguriruemye_kontrolleryi-elektroprivoda-serii-irmck/ (accessed: September 15, 2025).
9. Available at: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=148398> (accessed: October 1, 2025).

Received: July 14, 2025

Accepted: August 04, 2025

Author's information:

Irina I. LAPSAR' — Master's Degree Student; irisha-zaichena@yandex.ru

Alexey E. TSAPLIN — PhD in Engineering, Associate Professor; tsaplin.alexey@mail.ru