



Е. С. Безридный<sup>1</sup>, Н. В. Буякова<sup>2</sup>, А. В. Крюков<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup> Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>1,3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 16 апреля 2019 г.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ТЯГОВЫМИ СЕТЯМИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ И ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ

**Аннотация.** В статье представлена компьютерная технология моделирования электромагнитных полей в тяговых сетях железных дорог при движении высокоскоростных и тяжеловесных поездов. Движение поездов сопровождается ростом тяговых нагрузок, что может приводить к ухудшению электромагнитной обстановки (ЭМО) в тяговых сетях. Важными параметрами, характеризующими ЭМО, являются напряженности электрического и магнитного полей. Поэтому становится актуальной задача определения напряженностей при создании полигонов высокоскоростного и тяжеловесного движения. Методы и средства моделирования режимов систем тягового электроснабжения на основе фазных координат, разработанные в ИрГУПСе, дают возможность в процессе проведения расчета режима определить напряженности электромагнитных полей. Результаты компьютерного моделирования позволили сформулировать следующие выводы: при движении высокоскоростных поездов повышаются падения напряжений в тяговой сети, что приводит к незначительному снижению (на 0,3 %) максимумов напряженности электрического поля; средние значения этого показателя возрастают на 0,2 % из-за увеличения временных промежутков, в которых отсутствовали поезда в межподстанционных зонах; существенный рост тяговых нагрузок при движении электропоездов Сапсан приводят к двукратному повышению напряженностей магнитного поля и ухудшению ЭМО по этому показателю; при расширении полигонов и размеров движения высокоскоростных поездов следует планировать мероприятия, направленные на улучшение условий электромагнитной безопасности на пассажирских платформах; массы поездов неоднозначно влияют на зависимости напряженностей поля от времени при движении поездов на подъем; это связано с увеличением межпоездных интервалов с ростом массы поездов; наибольшие колебания напряженностей наблюдаются для поездов максимальной массы; увеличение напряженности электрического поля и снижение напряженности магнитного поля к концу интервала времени моделирования связано с уходом пачки поездов из рассматриваемой межподстанционной зоны.

**Ключевые слова:** железная дорога, тяговая сеть, моделирование электромагнитных полей, движение высокоскоростных и тяжеловесных поездов.

Е. С. Bezridnyi<sup>1</sup>, N. V. Buyakova<sup>2</sup>, A. V. Kryukov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: April 16, 2019

## MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS CREATED BY TRACTION NETWORKS DURING THE MOTION OF HIGH-SPEED AND HEAVY TRAINS

**Abstract.** The article presents computer technology for modeling electromagnetic fields in traction networks of railways during the motion of high-speed and heavy trains. The motion of this kind of trains is accompanied by an increase in traction loads, which can lead to a deterioration of the electromagnetic environment in traction networks. Important parameters characterizing the electromagnetic environment are the strengths of the electric and magnetic fields. Therefore, the task of determining the strengths when creating polygons of high-speed and heavy traffic becomes relevant. Methods and tools of modeling the modes of traction power supply systems based on phase coordinates, developed at Irkutsk State Transport University, make it possible to determine the strengths of electromagnetic fields in the process of calculating the mode. The results of computer modeling allowed us to formulate the following conclusions: when high-speed trains are moving, there is an increase in voltage drops in the traction network, which results in a slight decrease (by 0,3 %) of the maximum electric field strengths; average values of this indicator grow by 0,2 % due to the increase in time intervals in which there were no trains in the inter-substation zones; a significant increase in traction loads during the motion of Sapsan electric trains leads to a twofold increase in the magnetic field strengths and deterioration in the electromagnetic environment for this indicator; when expanding the polygons and the amount of high-speed traffic, measures should be planned to improve the conditions of electromagnetic safety on passenger platforms; train masses ambiguously affect the dependence of field strengths on time when trains move on the ascending grade; this is due to increase in inter-train intervals with growth in the mass of trains; the largest fluctuations in strengths are observed for trains with maximum mass; an increase in the electric field strength and a decrease in the magnetic field strength at the end of the simulation time interval is due to the departure of the bunch of trains from the considered inter-substation zone.

**Keywords:** railway, traction network, modeling of electromagnetic fields, motion of high-speed and heavy trains.

## Введение

В настоящее время эксплуатируются и строятся железнодорожные магистрали со скоростью движения свыше 160 км/ч, электрифицированные преимущественно на переменном токе [1, 2]. Высокоскоростные магистрали позволяют получить следующие результаты:

- повысить связность территорий, увеличить мобильность и экономическую активность населения;
- развить транспортное машиностроение, производство новых материалов и электронных систем;
- на основе разделения пассажирского и грузового движения снизить себестоимость и качество перевозок;
- эффективно использовать транзитный потенциал территорий.

Эффективным инструментом для роста провозной способности железных дорог является организация движения тяжеловесных грузовых поездов, позволяющая увеличить производительность локомотивов, создать резервы пропускной способности и сократить энергопотребление на тягу поездов [3–6].

Однако движение высокоскоростных и тяжеловесных поездов сопровождается ростом тяговых нагрузок [7], что может приводить к ухудшению электромагнитной обстановки (ЭМО) в тяговых сетях (ТС). Важными параметрами, характеризующими ЭМО, являются напряженности электрического и магнитного полей [8–16]. Поэтому становится актуальной задача определения напряженностей при создании полигонов высокоскоростного и тяжеловесного движения.

Наиболее адекватно анализ уровней напряженностей в эксплуатируемых и проектируемых ТС можно выполнять на основе компьютерного моделирования [12]; при этом используются методы, которые базируются на конформных преобразованиях и конечных разностях [11]. Однако, при их практическом применении необходима трудоемкая подготовка исходных данных, а также требуются значительные затраты времени на освоение программного обеспечения.

Методы и средства моделирования режимов систем тягового электроснабжения (СТЭ) на основе фазных координат [17] дают возможность в процессе проведения расчета режима определить напряженности электромагнитных полей [18–21].

## Методика моделирования

В ИрГУПСе разработаны методы моделирования СТЭ в фазных координатах, которые базируются на решетчатых схемах замещения (РСЗ), обладающих полносвязной топологией. С помощью процедуры объединения РСЗ, сформированных для отдельных элементов трехфазно-однофазной сети, ре-

ализуется модель для расчета режимов. Такая методика моделирования режимов СЭЖД реализована в комплексе программ Fazonord [17].

После определения режима СТЭ рассчитываются напряженности электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых многопроводными тяговыми сетями, по методике, описанной в работах [17–21].

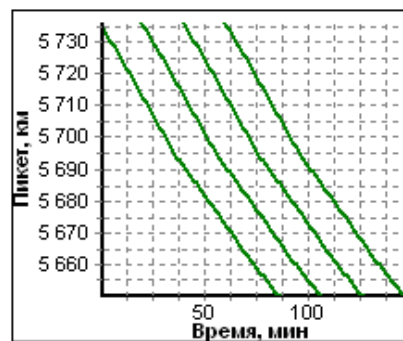
Задача моделирования ЭМП с учетом движения поездов может быть представлена так:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{Y}_k, t = t_k) \Rightarrow \mathbf{EMF}_k = \mathbf{V}(\mathbf{X}_k) \Rightarrow \Rightarrow \mathbf{EMF}_k = (\mathbf{E}_X^{(k)} \quad \mathbf{E}_Y^{(k)} \quad \mathbf{E}_{MAX}^{(k)} \quad \mathbf{H}_X^{(k)} \quad \mathbf{H}_Y^{(k)} \quad \mathbf{H}_{MAX}^{(k)})$$

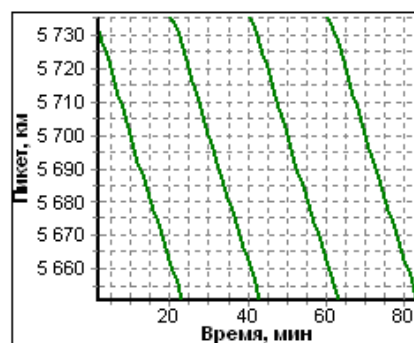
где  $\mathbf{X}_k$  – параметры режима, отвечающие дискретному моменту времени  $t_k$ ;  $\mathbf{F}^{-1}$  – оператор, соответствующий процедуре решения уравнений режима для  $t = t_k$ ;  $\mathbf{Y}_k$  – вектор независимых переменных;  $\mathbf{EMF}_k$  – вектор составляющих ( $\mathbf{E}_X^{(k)}, \mathbf{E}_Y^{(k)}, \mathbf{H}_X^{(k)}, \mathbf{H}_Y^{(k)}$ ) и экстремальных значений ( $\mathbf{E}_{MAX}^{(k)}, \mathbf{H}_{MAX}^{(k)}$ ) напряженностей ЭМП; символ  $\mathbf{E}$  относится к электрическому полю, а  $\mathbf{H}$  – к магнитному.

## Результаты моделирования ЭМП при движении высокоскоростных поездов

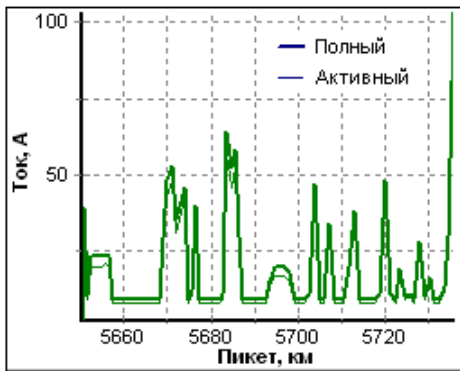
При моделировании рассматривалась СТЭ 2х25 кВ с питанием от сети 220 кВ при движении обычных пассажирских поездов и электропоездов Сапсан. Средняя участковая скорость для первого варианта составляла 60 км/час, а для второго – 230 км/час. Графики движения и токовые профили поездов показаны на рис. 1.



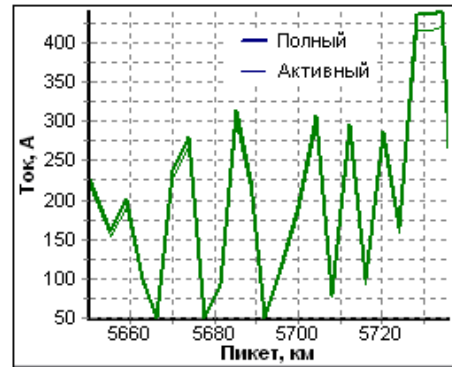
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Графики движения (а, б) и токовые профили (в, г): а, в – ВЛ-65; б, г – Сапсан

Моделирование проводилось с помощью программного комплекса Fazonord. Результаты моделирования представлены в табл. 1, 2 и на рис. 2–7.

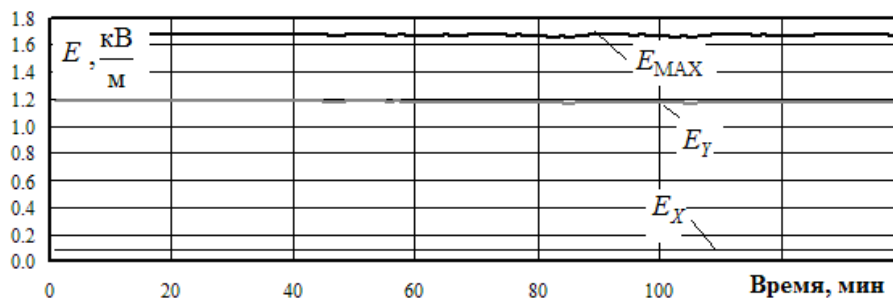


Рис. 2. Зависимости составляющих напряженности электрического поля при движении поездов с локомотивами ВЛ 65, рассчитанные для точки с координатами  $X = 0, Y = 1,8$  м

$E_X, E_Y, E_{MAX}$  – горизонтальная и вертикальная составляющие, а также экстремальное значение напряженности

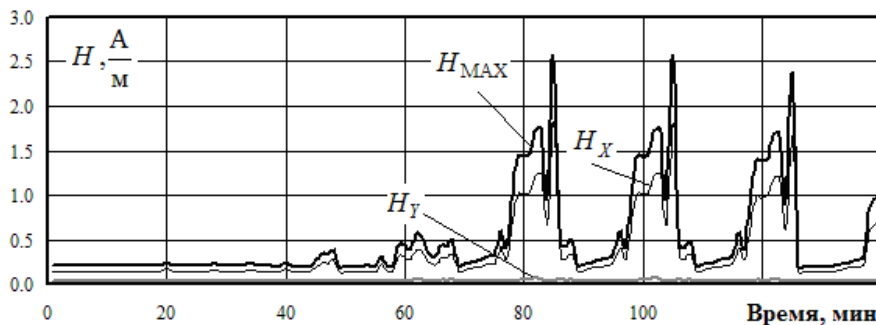


Рис. 3. Зависимости составляющих напряженности магнитного поля при движении поездов с локомотивами ВЛ 65, рассчитанные для точки с координатами  $X = 0, Y = 1,8$  м

$H_X, H_Y, H_{MAX}$  – горизонтальная и вертикальная составляющие, а также экстремальное значение напряженности

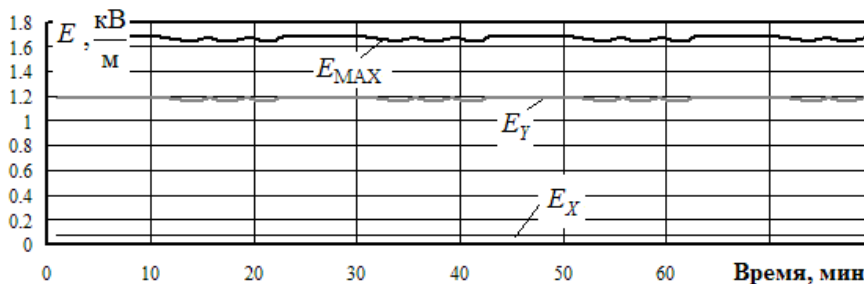


Рис. 4. Зависимости составляющих напряженности электрического поля при движении электропоездов Сапсан, вычисленные в точке с координатами  $X = 0, Y = 1,8$  м

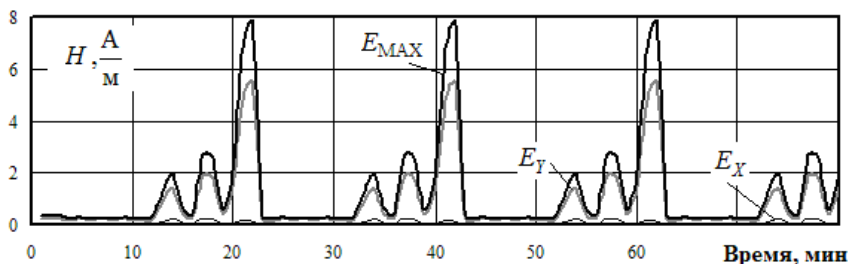


Рис. 5. Зависимости составляющих напряженности электрического поля при движении электропоездов Сапсан, рассчитанные для точки с координатами  $X = 0, Y = 1,8$  м

Таблица 1

Максимальные и средние значения составляющих напряженностей ЭМП

Локомотив	Параметр	Величины					
		$E_X, \frac{кВ}{м}$	$E_Y, \frac{кВ}{м}$	$E_{MAX}, \frac{кВ}{м}$	$H_X, \frac{А}{м}$	$H_Y, \frac{А}{м}$	$H_{MAX}, \frac{А}{м}$
ВЛ85	Среднее значение	0,08	1,18	1,67	0,37	0,03	0,53
	Максимум	0,08	1,18	1,68	1,82	0,06	2,57
Сапсан	Среднее значение	0,08	1,18	1,67	1,02	0,08	1,44
	Максимум	0,08	1,19	1,68	5,43	0,26	7,68

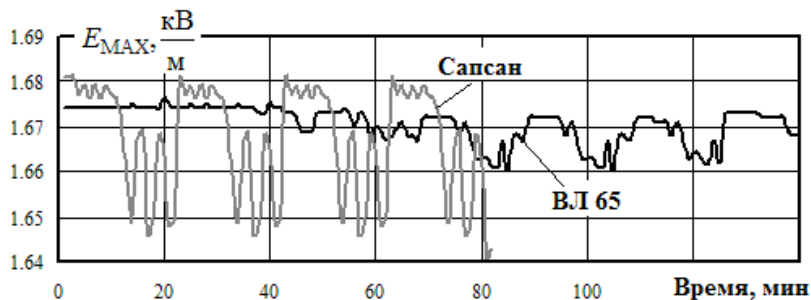


Рис. 6. Экстремальные значения напряженности электрического поля, рассчитанные для точки с координатами  $X = 0; Y = 1,8$  м

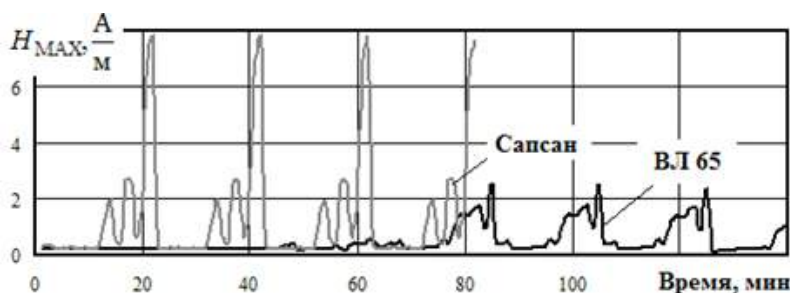


Рис. 7. Экстремальные значения напряженности магнитного поля, рассчитанные для точки с координатами  $X = 0; Y = 1,8$  м

Таблица 2

Максимальные и средние величины экстремальных напряженностей ЭМП

Параметр	Сапсан		ВЛ85		Различие	
	$E_{MAX}, \frac{кВ}{м}$	$H_{MAX}, \frac{А}{м}$	$E_{MAX}, \frac{кВ}{м}$	$H_{MAX}, \frac{А}{м}$	Между столбцами 1 и 4	Между столбцами 3 и 5
1	2	3	4	5	6	7
Среднее значение	1,677	1,44	1,670	0,53	-0,20	174
Максимум	1,681	7,68	1,676	2,57	0,30	200



Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- при движении высокоскоростных поездов повышаются падения напряжений в ТС, что приводит к незначительному снижению (на 0,3 %) максимумов напряженности электрического поля; средние значения этого показателя возрастают на 0,2 % из-за увеличения временных промежутков, в которых отсутствовали поезда в межподстанционных зонах;
- существенный рост тяговых нагрузок при движении электропоездов Сапсан приводят к двукратному повышению напряженностей магнитного поля и ухудшению ЭМО по этому показателю;
- при расширении полигонов и размеров движения высокоскоростных поездов следует планировать мероприятия, направленные на улучшение условий электромагнитной безопасности на пассажирских платформах.

#### Результаты моделирования ЭМП при движении высокоскоростных поездов

Организация движения тяжеловесных грузовых поездов рассматривается как эффективный инструмент для роста провозной способности железных дорог, увеличения производительности локомотивов, создания резервов пропускной способности и сокращения энергопотребления на тягу поездов. Основной задачей ОАО «РЖД» на период до 2020 г. является повышение провозной способности за счет движения поездов с массой 9000 тонн и более, которые будут курсировать на основных направлениях железнодорожной сети. Тяжеловесное движение по перевозке каменного угля, нефти, минеральных удобрений уже организовано на ряде участков сети, что позволило сократить расходы на транспортировку грузов.

Рост масс поездов и скоростей их движения сопровождается увеличением нагрузок систем тягового электроснабжения, что требует всестороннего анализа режимов СТЭ. Используемый на сети дорог программный комплекс Кортэс позволяет решать боль-

шинство режимных задач, однако он имеет существенные ограничения в следующих направлениях:

- анализ качества электрической энергии на шинах питающего напряжения тяговых подстанций переменного тока и районах электроснабжения (РЭС) нетяговых и нетранспортных потребителей;
- расчеты уравнивающих токов, вызванных транзитом мощности в системе внешнего электроснабжения;
- комплекс Кортэс завышает напряжения на токоприемниках электропоездов переменного тока из-за принятой токовой модели тяговых нагрузок и использования в качестве характеристики системы внешнего электроснабжения мощностей короткого замыкания  $S_{kz}$ ; этот фактор становится существенным при  $S_{kz} < 700 \dots 1000$  МВ·А, и его значение возрастает при росте масс и скоростей движения поездов;
- комплекс Кортэс не позволяет проводить расчеты напряженностей электрических и магнитных полей тяговых сетей.

Решение перечисленных задач возможно с помощью программного комплекса компьютерного моделирования режимов Fazonord.

Фрагмент схемы расчетной модели ТС 25 кВ показан на рис. 8. Рассматриваемый двухпутный участок железной дороги представлен четырьмя тяговыми подстанциями с трансформаторами ТДТНЖ-40000/110 и тремя межподстанционными зонами протяженностью 40 км с контактной сетью каждого пути М-120+2МФ-100 (такая подвеска осталась на некоторых участках дороги после перевода с постоянного на переменный ток). Участок расположен на горном профиле с уклонами до 17 % с перевалом примерно посередине. Рассматривалось движение нечетных поездов массами 12000 т с интервалами 41 мин, 9000 т с интервалами 23 мин, 6000 т с интервалами 22 мин и поездов массами 3000 т с интервалами 10 мин. На отрицательных уклонах предусматривалось рекуперативное торможение. Графики движения поездов различной массы и их токовые профили показаны на рис. 9 и 10.

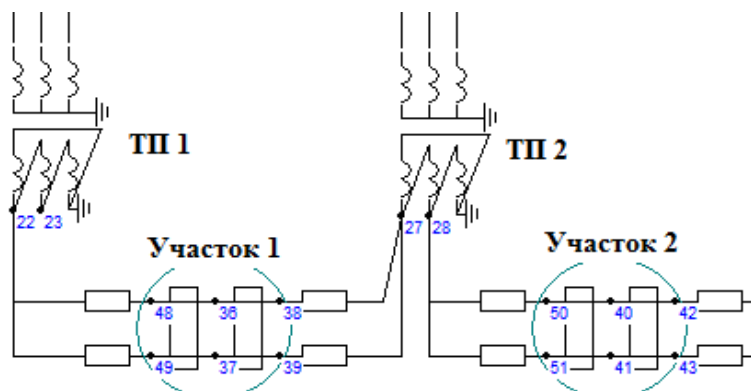
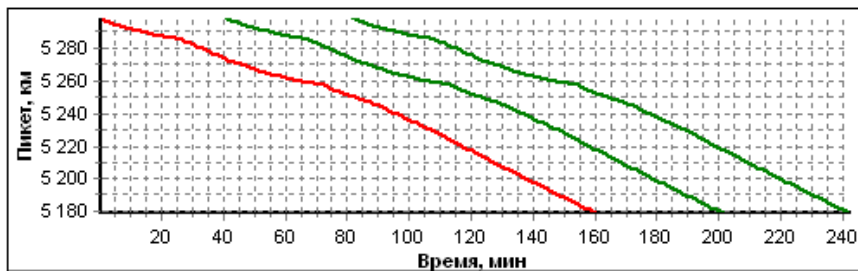
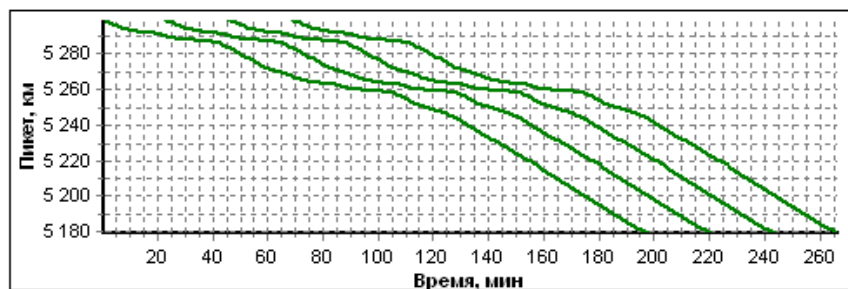


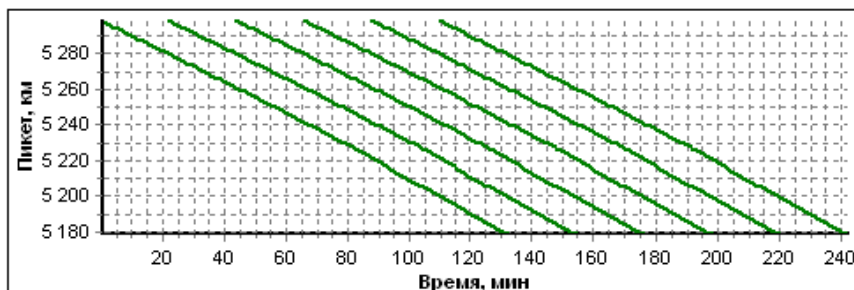
Рис. 8. Фрагмент схемы расчетной модели ПК Fazonord



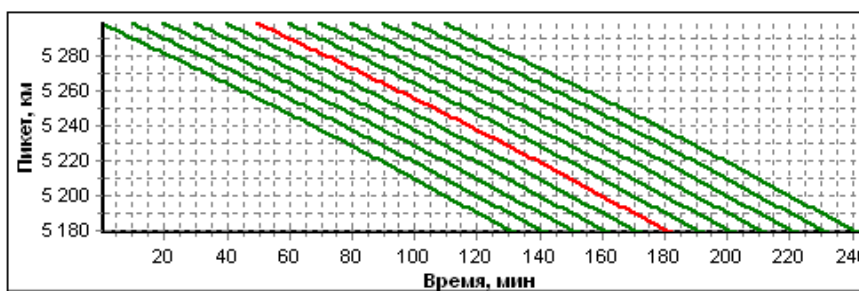
а)



б)



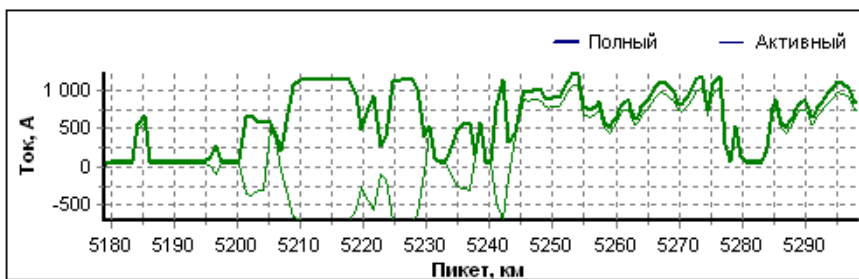
в)



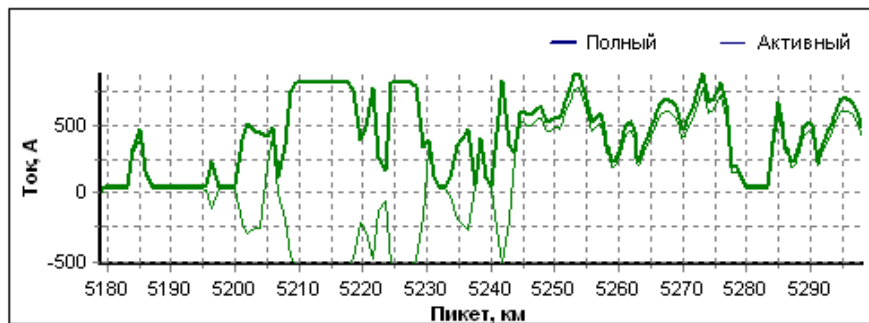
г)

Рис. 9. Графики движения поездов:

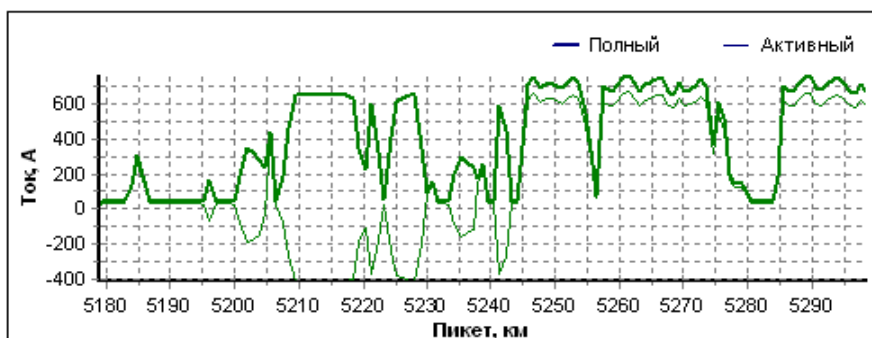
а – масса 12000 т; б – масса 9000 т; в – масса 6000 т; г – масса 3000 т



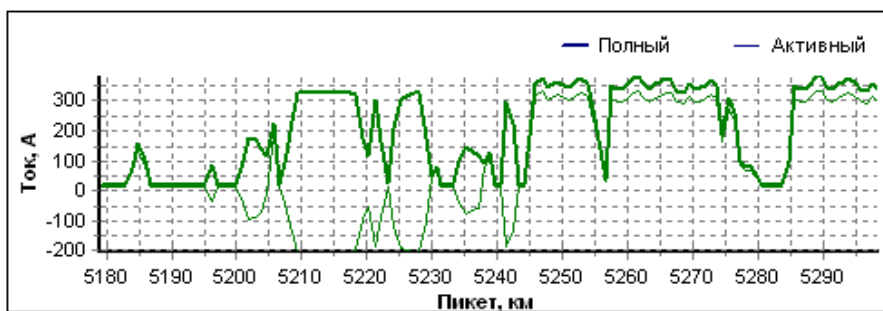
а)



б)



в)



г)

**Рис. 10. Токвые профили:**

а – масса 12000 т; б – масса 9000 т; в – масса 6000 т; г – масса 3000 т

При моделировании выполнены расчеты напряженностей электромагнитного поля в начале второго участка тяговой сети по рис. 8, удаленного от тяговой подстанции и расположенного на отрезке трассы с движением нечетных поездов на подъем.

Результаты моделирования ЭМП в междупутье на высоте 1,8 м представлены в табл. 3 и проиллюстрированы на рис. 11 и 12. Средние величины определены за интервал моделирования  $\Delta T = 100 \dots 200$  мин.

Т а б л и ц а 3

**Сводные показатели амплитуд напряженностей ЭМП**

Показатель	Параметр	Масса поезда, т			
		12000	9000	6000	3000
$E_{MAX}$ , кВ/м	Среднее	3,51	3,39	3,48	3,49
	Максимум	3,73	3,70	3,70	3,69
$H_{MAX}$ , А/м	Среднее	22,5	29,8	23,8	22,3
	Максимум	66,8	83,6	61,2	61,3

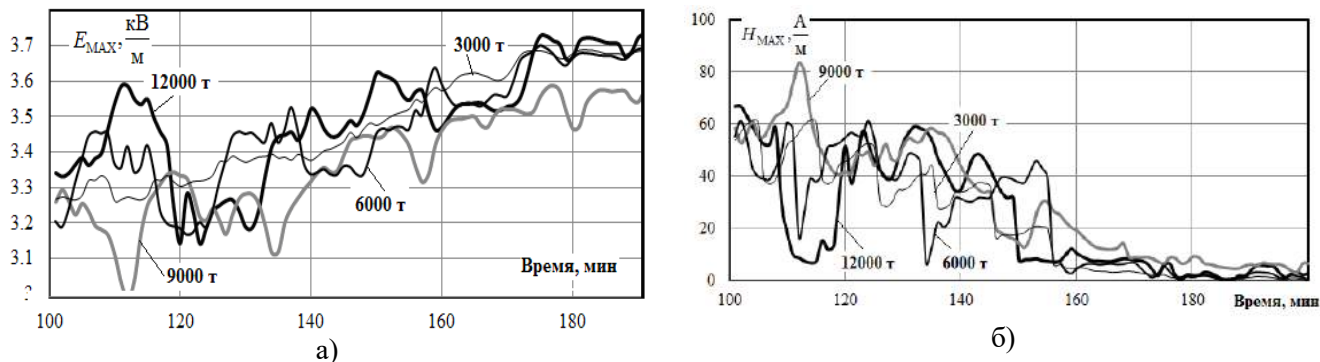


Рис. 11. Динамика изменений амплитуды напряженностей ЭМП:

а – электрическое поле; б – магнитное поле

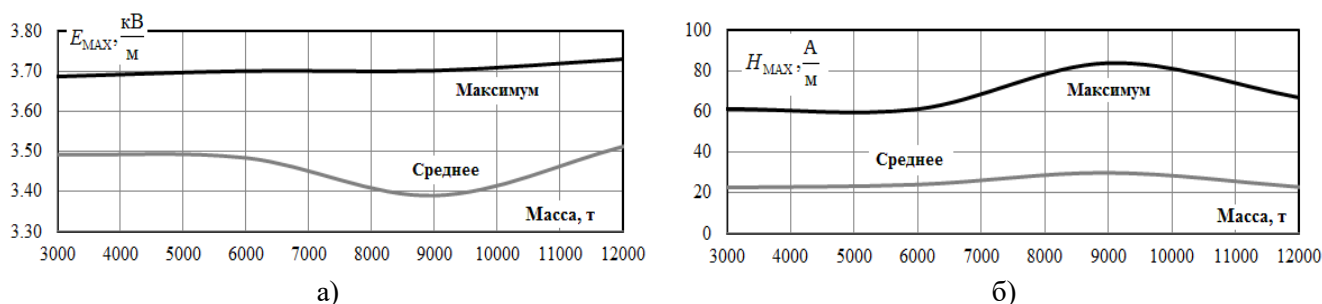


Рис. 12. Зависимости амплитуд напряженностей ЭМП от массы поезда:

а – электрическое поле; б – магнитное поле

Результаты моделирования показали, что:

- массы поездов неоднозначно влияют на зависимости напряженностей поля от времени при движении поездов на подъем; это связано с увеличением межпоездных интервалов с ростом массы поездов;
- наибольшие колебания напряженностей наблюдаются для поездов максимальной массы;
- наблюдающееся на графиках увеличение напряженности электрического поля и снижение напряженности магнитного поля к концу интервала времени моделирования связано с уходом пачки поездов из рассматриваемой межподстанционной зоны.

#### Заключение

На основе применения решетчатых схем за-

мещения реализована методика моделирования систем тягового электроснабжения при движении высокоскоростных и тяжеловесных поездов. Из-за существенного роста тяговых нагрузок при движении поездов Сапсан имеет место двукратное увеличение напряженностей магнитного поля на нормируемой высоте 1,8 метра.

Повышение масс грузовых поездов приводит к большой изменчивости магнитного поля, однако влияние масс на уровни напряженности неоднозначно в связи с различием межпоездных интервалов.

Электрическое поле тяговой сети при движении высокоскоростных поездов и поездов повышенной массы меняется незначительно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: общий курс / И.П. Киселев, Л.С. Блажко, А.Т. Бурков и др. В 2-х т. Т.1. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 306 с.
2. Шалимов М.Г., Маслов Г.П., Магай Г.С. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог. Омск: 2002. 49 с.
3. Лapidус Б.М. Научное обеспечение программы // Железнодорожный транспорт. № 9. 2014. С. 15-18.
4. Пехтерев Ф. С. Перспективные полигоны обращения тяжеловесных поездов // Железнодорожный транспорт. № 9. 2014. С. 7-10.
5. Гапанович, В. А. Оценка взаимодействия подвижного состава и пути // Железнодорожный транспорт. № 9. 2014. С. 11-14.
6. Курбасов А. С. Тяжеловесное движение грузовых поездов на российских железных дорогах: за и против // Наука и транспорт. № 3. 2012. С. 15-17.
7. Безридный Е.С., Буякова Н.В., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями при движении высокоскоростных поездов // Вестник АГТУ. № 11. 2017. С. 13-17.
8. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Управление электромагнитной обстановкой в тяговых сетях железных дорог. Ангарск: Изд-во АГТА, 2014. 158 с.
9. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения ЖД транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.
10. Аполлонский С.М., Каляда Т.В., Синдаловский Б.Е. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных по-





лях. СПб: Политехника, 2006. 263 с.

11. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей. М.: Маршрут, 2006. 992 с.
12. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге. В 2 тт. Т. II. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети. М.: РУСАЙНС, 2017, 414 с.
13. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. London: Springer, 2013, 529 p.
14. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09*. Kyoto, 2009, p. 567-570.
15. Сидоров А.И., Окраинская И.С. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. 204 с.
16. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. СПб.: Элмор, 2007. 184 с.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Buyakova N.V. Improvement of Electromagnetic Environment in Traction Power Supply Systems // *The power grid of the future. Proceeding № 2*. Otto-von-Guericke University Magdeburg, Magdeburg, 2013. P. 39-44.
19. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems // *Advances in Intelligent Systems Research*. Vol. 158. Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security" (IWCI 2018), 2018. С. 20-25.
20. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems / Natal'ya Buyakova, Vasily Zakaryukin, Andrey Kryukov, Tu Nguyen // *E3S, Web of Conferences* 58, 01006(2018) RSES 2018, P. 1-6.
21. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // *Advances in Engineering Research*. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). 2018. P. 219-225.

## REFERENCES

1. Kiselev I.P., Blazhko L.S., Burkov A.T. et al. *Vysokoskorostnoi zheleznodorozhnyi transport: obshchii kurs*. In 2 vols. Vol.1. Moscow: FSBEI "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport" Publ., 2014. 306 p.
2. Shalimov M.G., Maslov G.P., Magai G.S. *Sovremennoe sostoyaniye i puti sovershenstvovaniya si-stem elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog* [Current status and ways to improve the power supply systems of electric railways]. Omsk: 2002. 49 p.
3. Lapidus B.M. *Nauchnoe obespecheniye programmy* [Scientific support of the program]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, No. 9. 2014. Pp. 15-18.
4. Pekhterev F. S. *Perspektivnye poligony obrashcheniya tyazhelovesnykh poezdov* [Promising polygons for handling heavy trains]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, No. 9. 2014. Pp. 7-10.
5. Gapanovich V. A. *Otsenka vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i puti* [Assessment of the interaction of rolling stock and track]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, No. 9. 2014. Pp. 11-14.
6. Kurbasov A. S. *Tyazhelovesnoye dvizheniye gruzovykh poezdov na rossiiskikh zheleznykh dorogakh: za i protiv* [Heavy traffic of freight trains on Russian railways: pros and cons]. *Nauka i transport [Science and transport]*, No. 3. 2012. Pp. 15-17.
7. Bezridnyi E.S., Buyakova N.V., Kryukov A.V. *Modelirovaniye elektromagnitnykh polei, sozdavaemykh tyagovymi setyami pri dvizhenii vysokoskorostnykh poezdov* [Modeling of electromagnetic fields created by traction networks during the movement of high-speed trains]. *Vestnik AGTU [Vestnik of ASTU]*, No. 11. 2017. Pp. 13-17.
8. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. *Upravleniye elektromagnitnoi obstanovkoi v tyago-vykh setyakh zheleznykh dorog* [Management of the electromagnetic environment in traction networks of railways.]. Angarsk: AGTA Publ., 2014. 158 p.
9. Kosarev A.B., Kosarev B.I. *Osnovy elektromagnitnoi bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zh.-d. transporta* [Fundamentals of electromagnetic safety of railway power supply systems]. Moscow: Intekst Publ., 2008. 480 p.
10. Apollonskii S.M., Kalyada T.V., Sindalovskii B.E. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti cheloveka v elektromagnitnykh polyakh* [Human life safety in electromagnetic fields]. St. Petersburg: Politekhnik Publ., 2006. 263 p.
11. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. *Raschety elektromagnitnykh polei* [Calculations of electromagnetic fields]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 992 p.
12. Apollonskii S.M. *Problemy elektromagnitnoi bezopasnosti na elektrifitsirovannoi zheleznoi doroge. V 2 tt. T. II. Elektromagnitnaya bezopasnost' na zheleznoi doroge s peremennym tokom v tyagovoi seti* [Problems of electromagnetic safety on an electrified railway. In 2 vols. Vol. II. Electromagnetic safety on the railway with alternating current in the traction network]. Moscow: RUSAINS Publ., 2017, 414 p.
13. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. London: Springer, 2013, 529 p.
14. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09*. Kyoto, 2009. Pp. 567-570.
15. Sidorov A.I., Oskinskaya I.S. *Elektromagnitnye polya vblizi elektroustanovok sverkhvysokogo napryazheniya* [Problems of electromagnetic safety on an electrified railway. In 2 vols. T. II. Electromagnetic safety on the railway with alternating current in the traction network]. Chelyabinsk: YuUrGU Publ., 2008. 204 p.
16. Tsitsikyan G.N. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in the electric power industry]. St. Petersburg: Elmor Publ., 2007. 184 p.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonesesimmetrichnyye rezhimy elektricheskikh sistem* [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkut. un-ty Publ., 2005. 273 p.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Buyakova N.V. Improvement of Electromagnetic Environment in Traction Power Supply Systems. *The power grid of the future. Proceeding No. 2*. Otto-von-Guericke University Magdeburg, Magdeburg, 2013. Pp. 39-44.
19. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems. *Advances in Intelligent Systems Research*. Vol. 158. Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security" (IWCI 2018), 2018. Pp. 20-25.
20. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A., Nguyen T. *Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems*. *E3S, Web of Conferences* 58, 01006(2018) RSES 2018, Pp. 1-6.



21. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures. *Advances in Engineering Research. Vol. 158. International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018)*. 2018. Pp. 219-225.

### Информация об авторах

*Безридный Евгений Сергеевич* – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: bezrik4471@mail.ru

*Буякова Наталья Васильевна* – к. т. н., доцент, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: bn\_900@mail.ru.

*Крюков Андрей Васильевич* – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

### Authors

*Evgenii Sergeevich Bezridnyi* – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, e-mail: bezrik4471@mail.ru

*Natal'ya Vasil'evna Buyakova* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Angarsk State Technical University, e-mail: bn\_900@mail.ru.

*Andrei Vasil'evich Kryukov* – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

### Для цитирования

Безридный Е. С. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями при движении высокоскоростных и тяжеловесных поездов / Е. С. Безридный, Н. В. Буякова, А. В. Крюков, // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 60–69. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).60–69

### For citation

Bezridnyi E. S., Buyakova N. V., Kryukov A. V. Modelirovanie elektromagnitnykh polei, sozdavaemykh tyagovymi setyami pri dvizhenii vysokoskorostnykh i tyazhelovesnykh poezdov [Modeling of electromagnetic fields created by traction networks during the motion of high-speed and heavy trains]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 60–69. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).60–69

УДК 629.41

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69–75

**А. А. Аболмасов<sup>1</sup>, Д. О. Лисин<sup>2</sup>, В. А. Мельников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «ЛокоТех», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Кlover Групп», г. Москва, Российская Федерация

Дата поступления: 30 апреля 2019 г.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЛОКОМОТИВОВ ПО ДАННЫМ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

**Аннотация.** Начиная с 2012 г. компания «ЛокоТех-сервис» использует данные бортовых микропроцессорных систем локомотивов для их диагностики в сервисных локомотивных депо. Подтвержденный экономический эффект от сокращения затрат на сервисное обслуживание локомотивов только за 2015 г. превысил 100 млн руб. Проект «Умный локомотив», выполняемый «Кlover Групп» по заказу компании «Локомотивные технологии» с 2016 г. ставит перед собой амбициозную задачу по организации сбора и централизованного анализа данных микропроцессорных систем всех локомотивов новых серий, находящихся на сервисном обслуживании «ЛокоТех-Сервис». В настоящий момент, система находится в постоянной эксплуатации по тепловозам серий 2(3)ТЭ116У, ТЭП70БС(У) и 2ТЭ25КМ(А) и в опытной эксплуатации по электровозам серий 2(3,4)ЭС5К, ЭП1М(П), 2(3)ЭС4К и ЭП2К. Реализация проекта предполагает внедрение в уже существующих группах диагностики в сервисных локомотивных депо автоматизированного рабочего места, посредством которого будет осуществляться не только автоматизированная расшифровка данных микропроцессорных систем, но и их передача на сервер Умного локомотива для дальнейшей обработки. Несмотря на то, что автоматизированное рабочее место Умного локомотива находится в опытной эксплуатации только по тепловозам, уже сейчас обработка и загрузка данных на сервер производится в 35 из 54 сервисных локомотивных депо, входящих в периметр проекта. Однако возможности диагностики и прогнозирования остаточного ресурса оказываются во многом ограничены существующими методами обработки диагностической информации. Один из способов повышения точности анализа данных рассмотрен в данной статье.

**Ключевые слова:** диагностика, мониторинг, микропроцессорные системы управления, электрические машины, статистические методы.

**A. A. Abolmasov<sup>1</sup>, D. O. Lisin<sup>2</sup>, V. A. Melnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> LocoTech OOO, Moscow, the Russian Federation

<sup>2</sup> Clover Group OOO, Moscow, the Russian Federation

Received: April 30, 2019