

**Зарифьян Александр Александрович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С  
АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ПРИ  
ПИТАНИИ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Специальность 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация»**

**Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Колпахчян П.Г.**

**Ростов-на-Дону – 2016**

**Объектом исследования** являются пассажирские электровозы с асинхронным тяговым приводом.

**Предметом исследования** является энергетическая эффективность пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока.

**Целью работы** является создание метода адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока, основанного на возможности изменения числа работающих тяговых двигателей в зависимости от нагрузки, обусловленной условиями движения. Разработанные алгоритмы должны обеспечить стабилизацию мгновенных значений коэффициента полезного действия (при работе с частичной нагрузкой) на уровне его номинального значения. В результате будет достигнуто повышение энергетической эффективности локомотивной тяги.

## Актуальность темы исследования

В соответствии со «Стратегией развития холдинга "РЖД" до 2030 года», опубликованной 16.04.2014 г., и «Энергетической стратегией ОАО "РЖД" на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года» (№ 269р от 11.02.2008), предусматривается последовательное снижение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов: к 2030 году он должен составить 94,1%, если уровень 2012 года принять за 100%.

Поставленная задача имеет системный характер и требует для своего решения принятия целого комплекса мер.

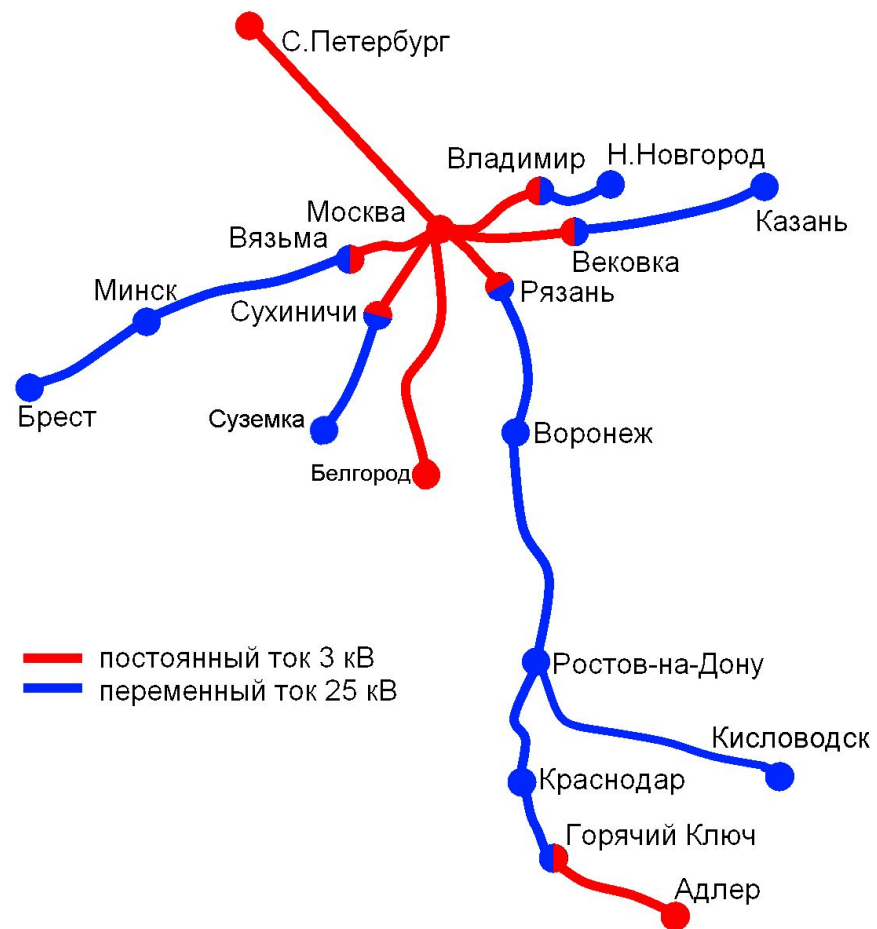
Прежде всего, признана необходимость переходить к производству электровозов нового поколения, имеющих более высокое значение КПД в номинальном режиме.

Такой переход предусмотрен документом «Типы и основные параметры локомотивов» (№ 747р от 27.11.2002 г.), во исполнение которого промышленностью начат выпуск пассажирских и грузовых электровозов с асинхронным тяговым приводом (АТП). В настоящее время идет накопление опыта их эксплуатации.

# Анализ эксплуатационных показателей

Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности пассажирских электровозов с АТП в реальных режимах движения показывает, что они в ряде случаев не находятся на должном уровне.

Причина заключается в том, что двухсистемные электровозы ЭП20 ведут поезда без смены локомотива на всем протяжении маршрута (около 1800 км для линии Москва – Адлер), который проходит по территориям с самым разнообразным рельефом местности и состоянием пути, где имеются ограничения по скорости, а вес поезда в осенне-зимний период меньше расчетного. Как следствие, электровоз длительное время работает с частичной нагрузкой и его энергоэффективность далека от номинальной.



## Мощность на валах АТД, кВт



Например, на равнинном участке Москва – Рязань, где средняя скорость движения составляет около 70 км/ч, наблюдается повышенный расход электроэнергии (здесь применяются электровозы ЭП20 с конструкционной скоростью 160 км/ч).

Эксплуатационное значение КПД в режиме тяги в одной из поездок – **0.65**, коэффициент использования мощности – **0.156**.

## Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи

1. На основании критического анализа литературных источников сделан вывод о возможности повышения энергоэффективности электровоза с многодвигательным тяговым приводом путем регулирования мощности и числа работающих тяговых двигателей.

2. Выполнена обработка записей бортового регистратора, что позволило установить зависимость показателей энергоэффективности электровоза от его скорости, профиля пути и составности поезда в различных условиях движения. Путем статистической обработки массивов записей бортового регистратора получена зависимость КПД электровоза от реализуемой мощности, построена аналитическая аппроксимация полученной зависимости.

3. Разработан алгоритм адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока. Алгоритм обеспечивает стабилизацию мгновенных значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне его номинального значения, имеющего место при полной нагрузке. Предложена структура системы управления тяговыми двигателями, включающая этот алгоритм.

4. Создана полноразмерная компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы, причем реализовано индивидуальное регулирование силы тяги. Построена компьютерная модель пассажирского поезда, включающего электровоз и состав, позволяющая воспроизводить режим ведения поезда по конкретному участку и рассчитывать основные показатели энергопотребления.

5. Выполнено компьютерное моделирование движения пассажирского поезда по типовым участкам условных профилей длиной около 150 км, как при всех работающих тяговых двигателях, так и с использованием предлагаемого алгоритма управления энергоэффективностью путём регулирования мощности и числа тяговых двигателей.

6. Сформулированы дополнительные требования, которые должны быть соблюдены при использовании предлагаемого алгоритма управления энергетической эффективностью. Изучены условия работы в контакте «колесо-рельс» для всех колесных пар, свидетельствующие об отсутствии срывов в буксование при отключении/подключении тяговых двигателей.

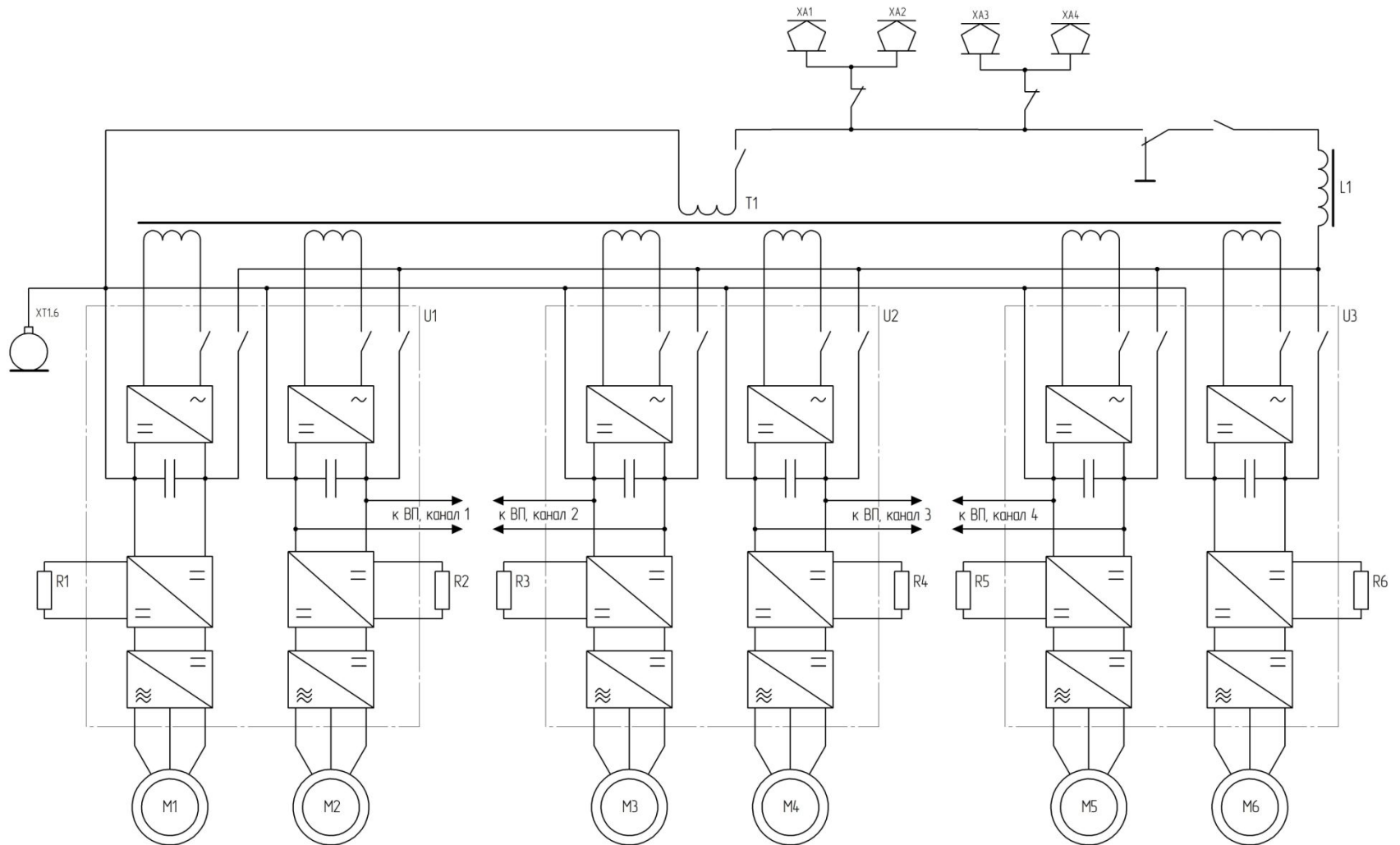
## Глава 1 «Состояние вопроса. Постановка задачи исследования»

Большой вклад в поиск путей решения задачи повышения энергоэффективности локомотивной тяги путем регулирования числа одновременно работающих тяговых двигателей внесли такие исследователи, как В.В. Артемчук, В.М. Бабич, Е.Г. Бове, О. И. Бондарь, П.И. Борцов, Х.Я. Быстрицкий, А.А. Варламов, Г.К. Гетьман, В.И. Гончаров, З. М. Дубровский, В.Л. Закорюкин, А.В. Заручейский, Г.Я. Классен, П.Ю. Красовский, А. Н. Крыгин, В.Г. Кузнецов, В.Ф. Кулиш, А.С. Курбасов, В.А. Кучумов, В.А. Легостаев, В. Н. Лисунов, Н.О. Логвинова, Р.Я. Медлин, Д.В. Мурзин, Р.В. Мурзин, О.А. Некрасов, Н. Б. Никифорова, А.Е. Пыров, В.И. Рахманинов, С.М. Рождественский, О.И. Саблин, В. А. Сенаторов, С.В. Сорокин, Н.Г. Тарасов, Ю.А. Усманов, С.В. Фадеев, В.П. Феокистов, В. В. Ширяев, В. Dalla Chiara, A. Muller, M. Netz, M. Niessen, R. Ricagno, M. Santarelli, J. Schaarschmidt и другие.

*«Из известных технических решений следует отметить отключение секций электровозов или некоторой части тяговых двигателей на электровозе. Эти подходы были исследованы ранее, однако в силу ограниченных возможностей регулирования ТЭД не удавалось достичь приемлемых результатов. Современные электровозы с управляемыми преобразователями позволяют вновь вернуться к этому вопросу.»*

Заручейский, А.В. Анализ научных подходов к повышению эффективности использования грузовых электровозов / А.В. Заручейский, Р.В. Мурзин, В.А. Кучумов, Н.Б. Никифорова Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – №1 – С. 37-41.

# Силовая схема электровоза ЭП20



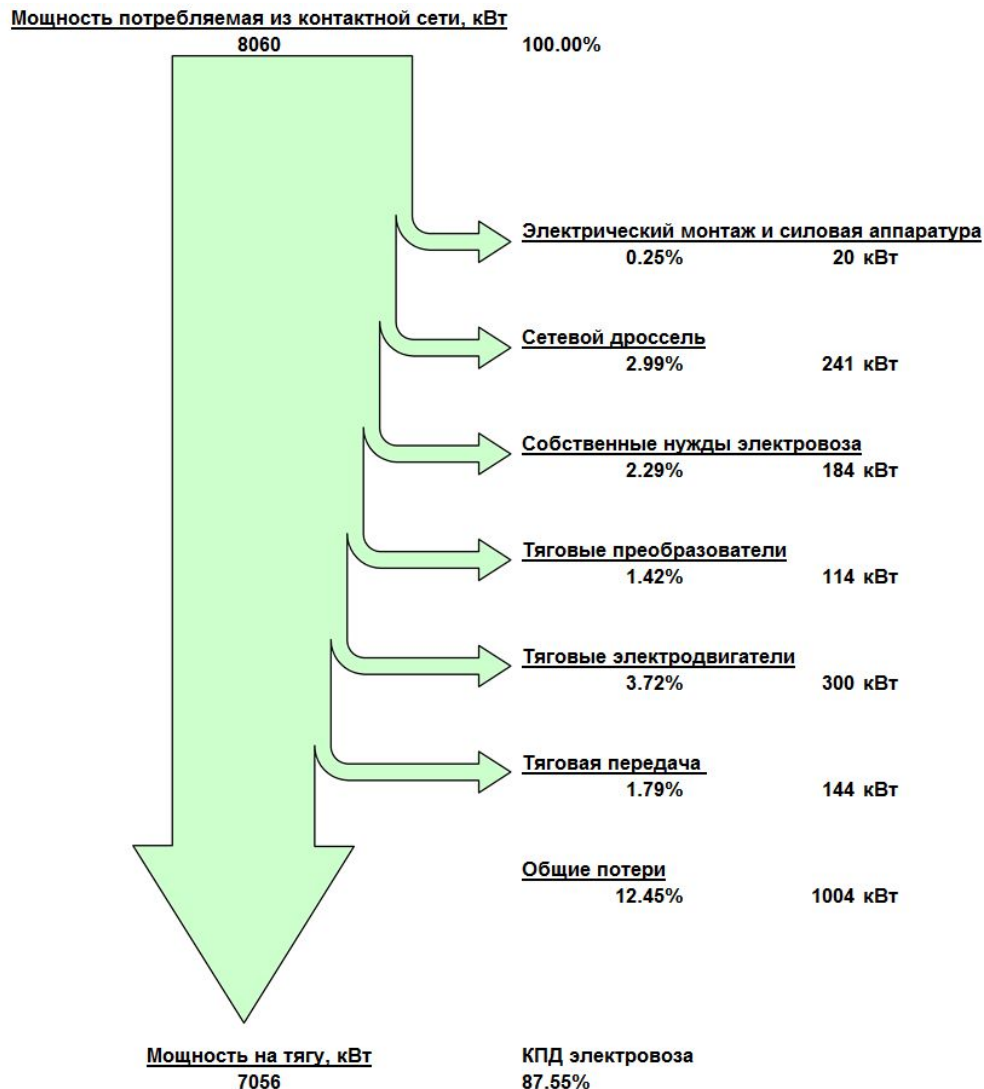


## Глава 2 «Алгоритм повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока»

Необходимо различать КПД локомотива как силовой установки и КПД эксплуатационный, который зависит от времени работы локомотива в различных режимах при движении поезда и от расхода энергии на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок.

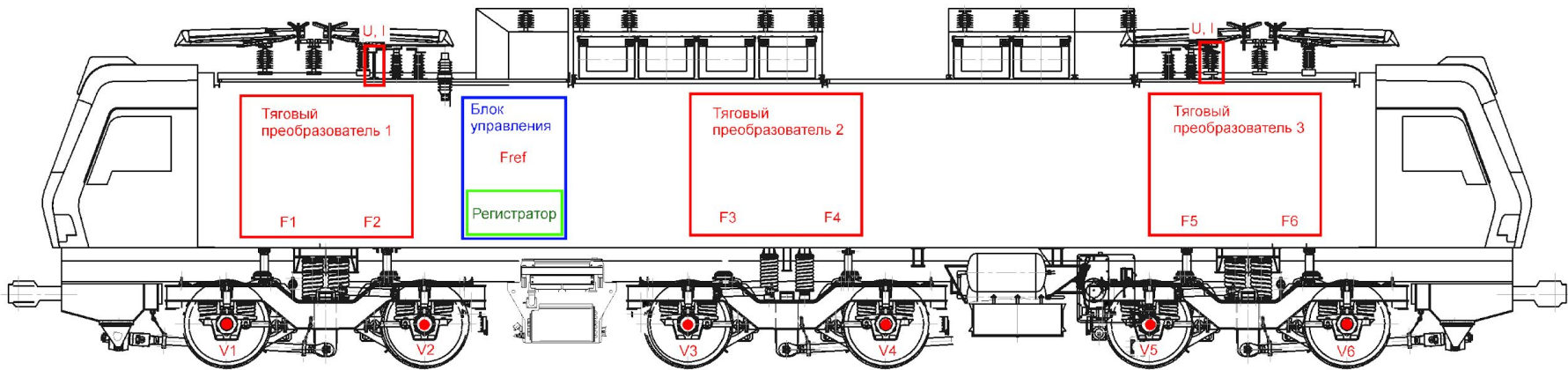
$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{т}} + P_{\text{п}} + P_{\text{сн}}},$$

где  $P_{\text{пол}}$  – полезная мощность,  
 $P_{\text{затр}}$  – затраченная мощность,  
 $P_{\text{т}}$  – мощность на тягу поезда,  
 $P_{\text{п}}$  – мощность потерь,  
 $P_{\text{сн}}$  – мощность, затрачиваемая на собственные нужды.



# Определение эксплуатационного КПД электровоза

Для анализа энергетической эффективности электровоза ЭП20 был использован штатный бортовой регистратор отечественного производства, предназначенный для записи и хранения диагностической и служебной информации, получаемой от аппаратуры управления и диагностики локомотива по каналам связи.



Параметры, полученные из бортового регистратора:

- **U** – напряжение контактной сети
- **I** – ток, потребляемый электровозом
- **Fref** – заданная сила тяги
- **F1..F6** – касательная сила тяги на каждой оси
- **V** – скорость электровоза

# Потребление энергии на участках постоянного тока

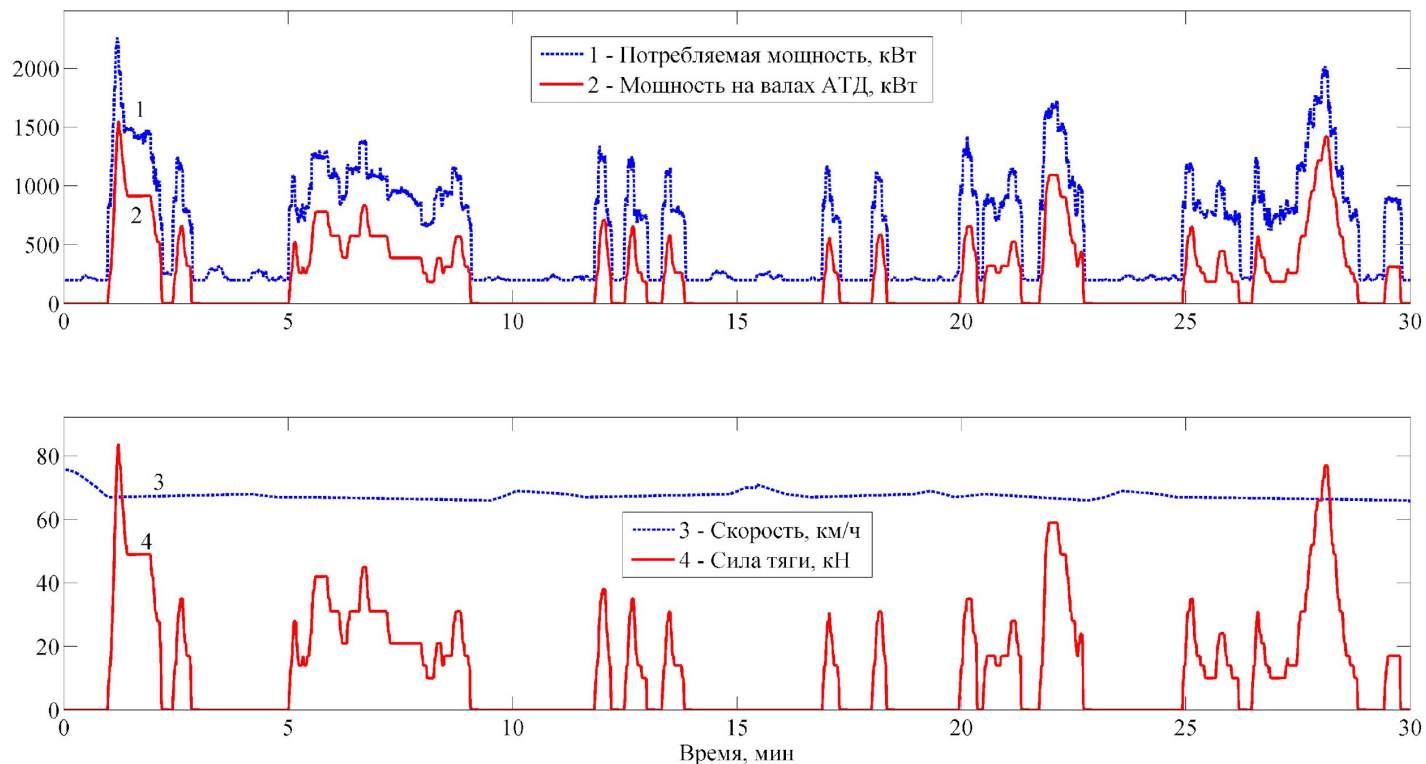
## Основные параметры участков

Параметр \ Участок	СПб – Москва	Туапсе – Г. Ключ	Москва – Рязань
Расстояние, км	644,5	83	199
Время в пути, мин (ч)	278 (4,63)	85 (1,42)	176 (2,93)
Время в режиме тяги, мин (ч)	169 (2,81)	40 (0,67)	86 (1,44)
Средняя скорость, км/ч	139,1	58,6	67,8
Максимальная скорость, км/ч	198	83	118

## Показатели энергетической эффективности

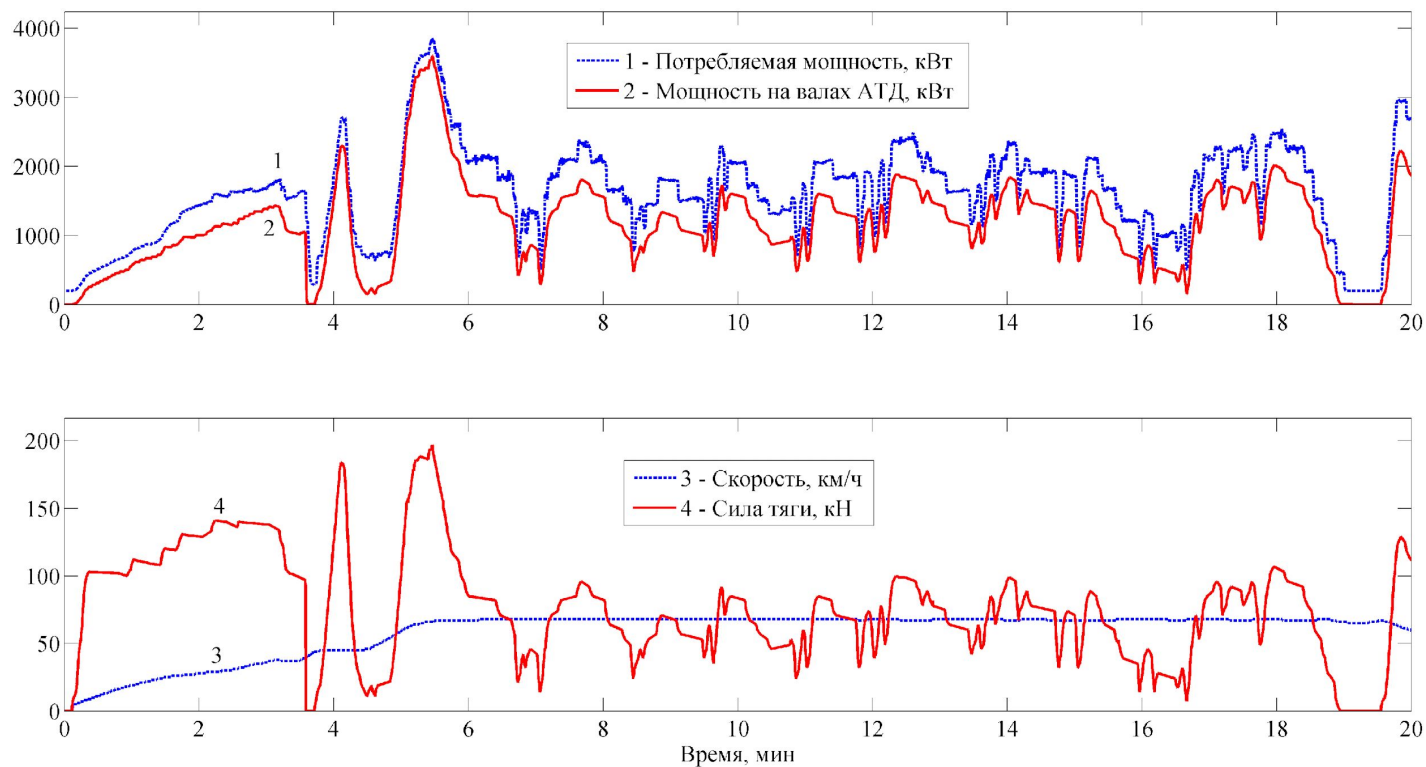
№№	Параметр / Участок	СПб – Москва	Туапсе – Г. Ключ	Москва – Рязань
По всем режимам (за всю поездку)				
1	Полная энергия, потребленная из контактной сети, кВт·ч	11055	1523	2841
2	Потенциально возможная энергия на валах ТЭД (исходя из часовой мощности 7200 кВт), кВт·ч	33342	10152	21059
3	Энергия на валах АД, кВт·ч	8218	1089	1620
4	КИМ = (3) / (2)	0,246	0,107	0,077
5	КПД = (3) / (1)	0,743	0,715	0,570
6	Средняя мощность на тягу, кВт	1775	767	553
Движение в режиме тяги (за всю поездку)				
7	Энергия, потребленная из контактной сети, кВт·ч	10442	1430	2494
8	Потенциально возможная энергия на валах ТЭД (исходя из часовой мощности 7200 кВт), кВт·ч	20232	4824	10368
9	КИМ = (3) / (8)	0,406	0,226	0,156
10	КПД = (3) / (7)	0,787	0,762	0,650
11	Средняя мощность на тягу, кВт	2921	1625	1125

## Фрагмент записи бортового регистратора на участке Москва – Рязань



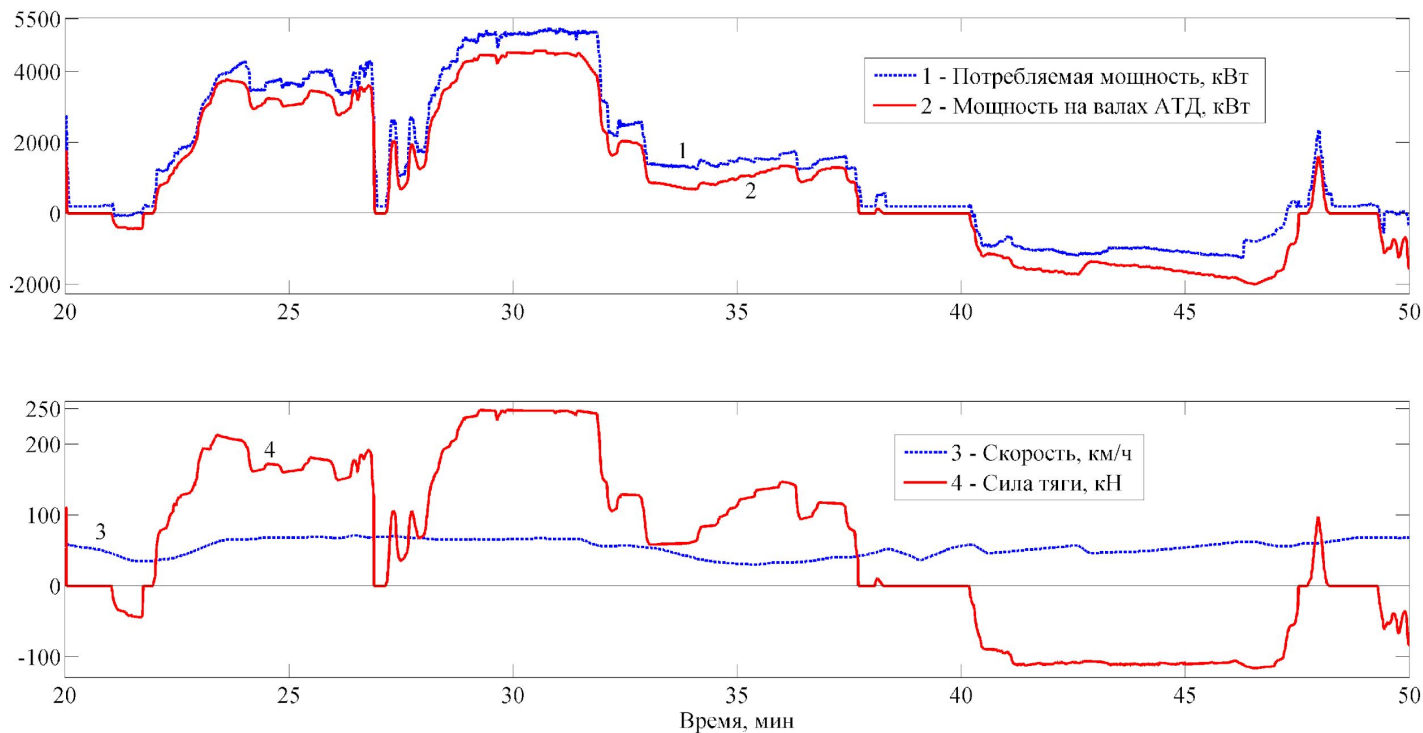
На диаграммах показаны данные, полученные при поездке электровоза ЭП20-015 07.04.2014 по участку Москва – Рязань с 11 пассажирскими вагонами.

## Фрагмент записи бортового регистратора на участке Туапсе - перевал



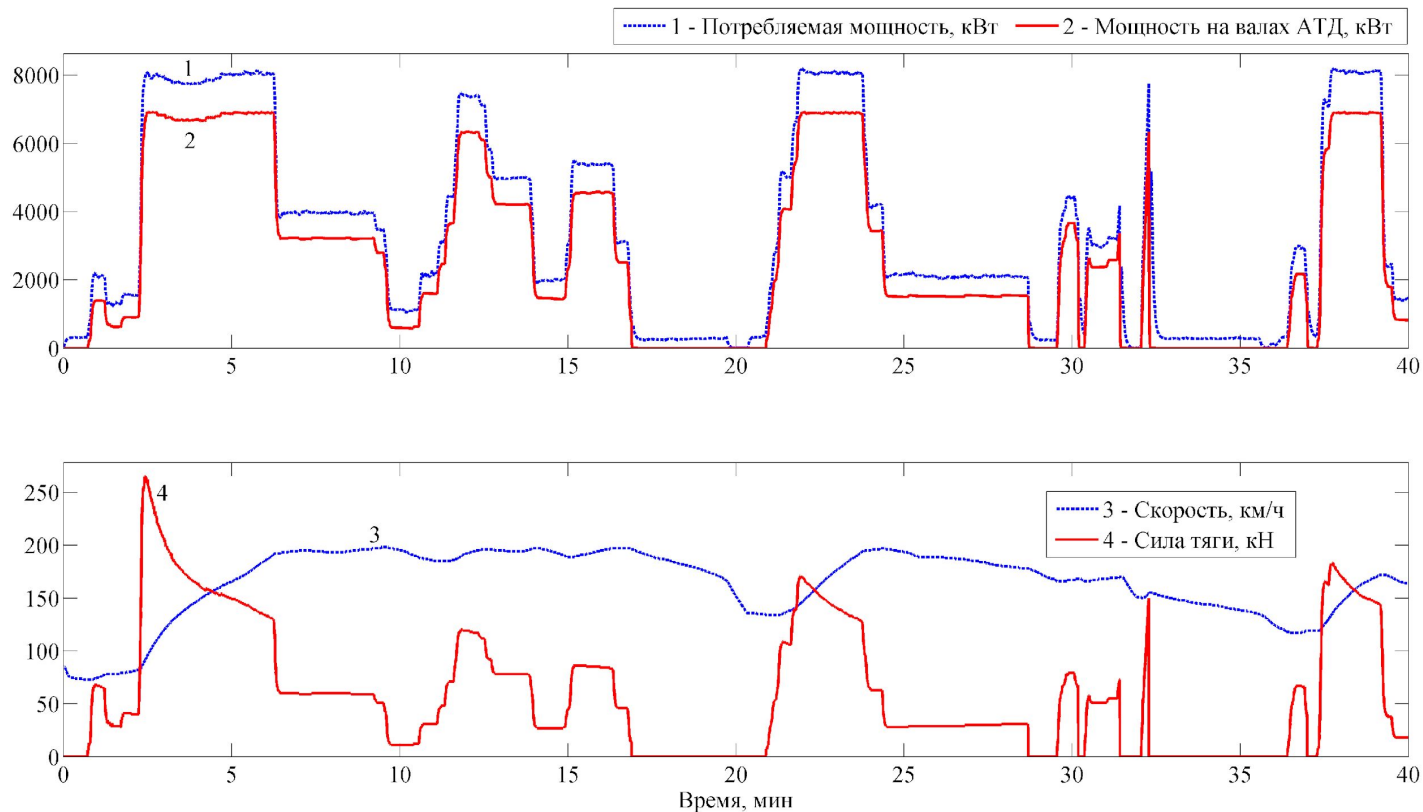
Записи регистратора поезда Адлер – Москва,  
14.04.2014, электровоз ЭП20-023, состав из 15 вагонов.

## Фрагмент записи бортового регистратора на участке Туапсе - перевал



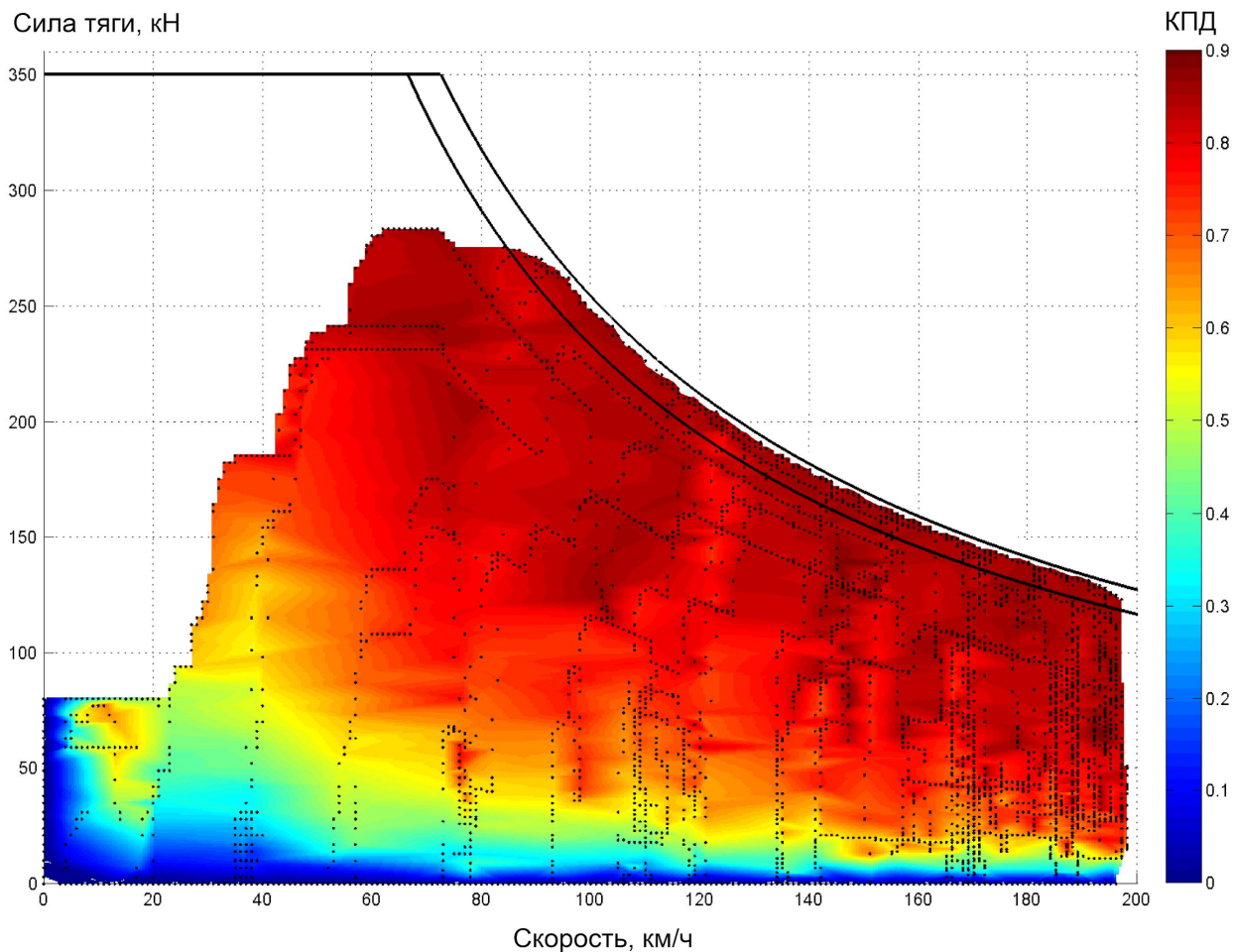
Записи регистратора поезда Адлер – Москва,  
14.04.2014, электровоз ЭП20-023, состав из 15 вагонов.

## Фрагмент записи бортового регистратора на участке С. Петербург - Москва



Фрагмент записи бортового регистратора пассажирского электровоза ЭП20-006 с фирменным поездом «Невский экспресс», полученные 09.07.2013 г. Вес поезда 882 тс, 12 вагонов.

# Эксплуатационный КПД электровоза по данным бортового регистратора



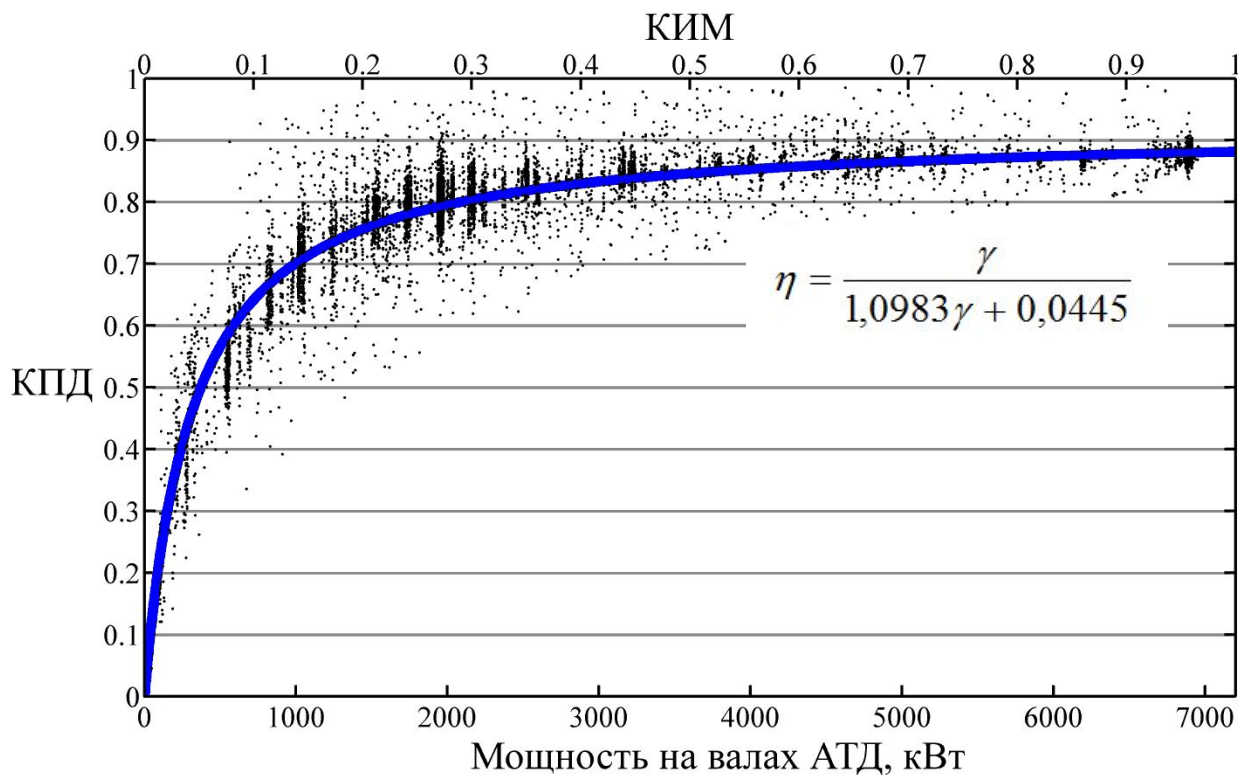
Зависимость КПД электровоза от его касательной силы тяги и скорости, полученная путем статистической обработки записей бортового регистратора, отображена в виде цветовой карты. Линиями показаны тяговые характеристики ЭП20 в часовом и продолжительном режимах.



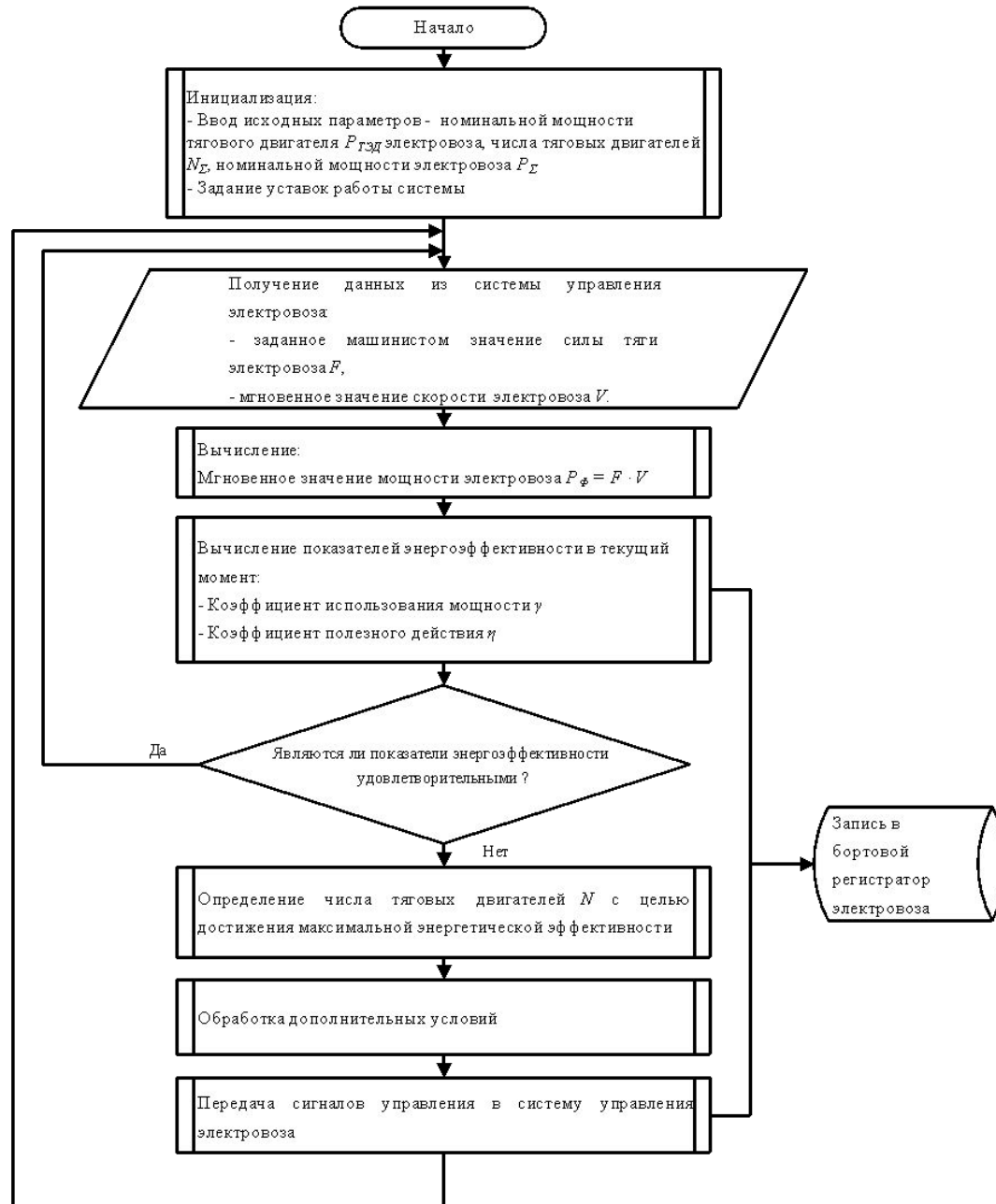
## Зависимость КПД электровоза ЭП20 от мощности на валах АТД

Диаграмма получена в результате обработки записей регистраторов, полученных во время поездок на участках маршрута Москва – Адлер, электрифицированных на постоянном токе. Здесь учитывается работа преобразователей и двигателей, тепловые и электромагнитные потери, затраты на собственные нужды.

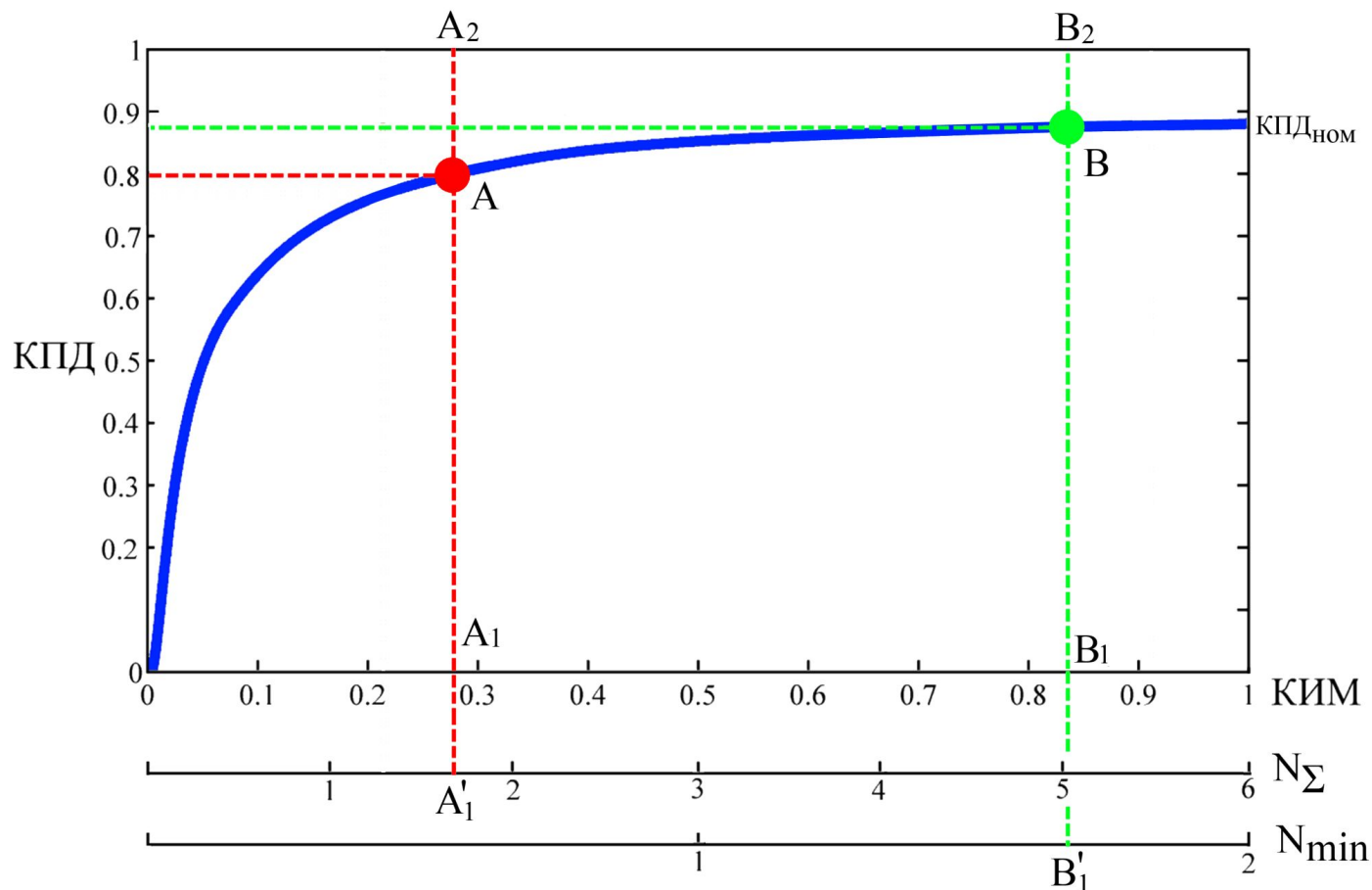
Можно сказать, что это результат многократно повторенного натурального эксперимента, условия которого определены режимами эксплуатации.



# Алгоритм регулирования мощности и числа тяговых двигателей

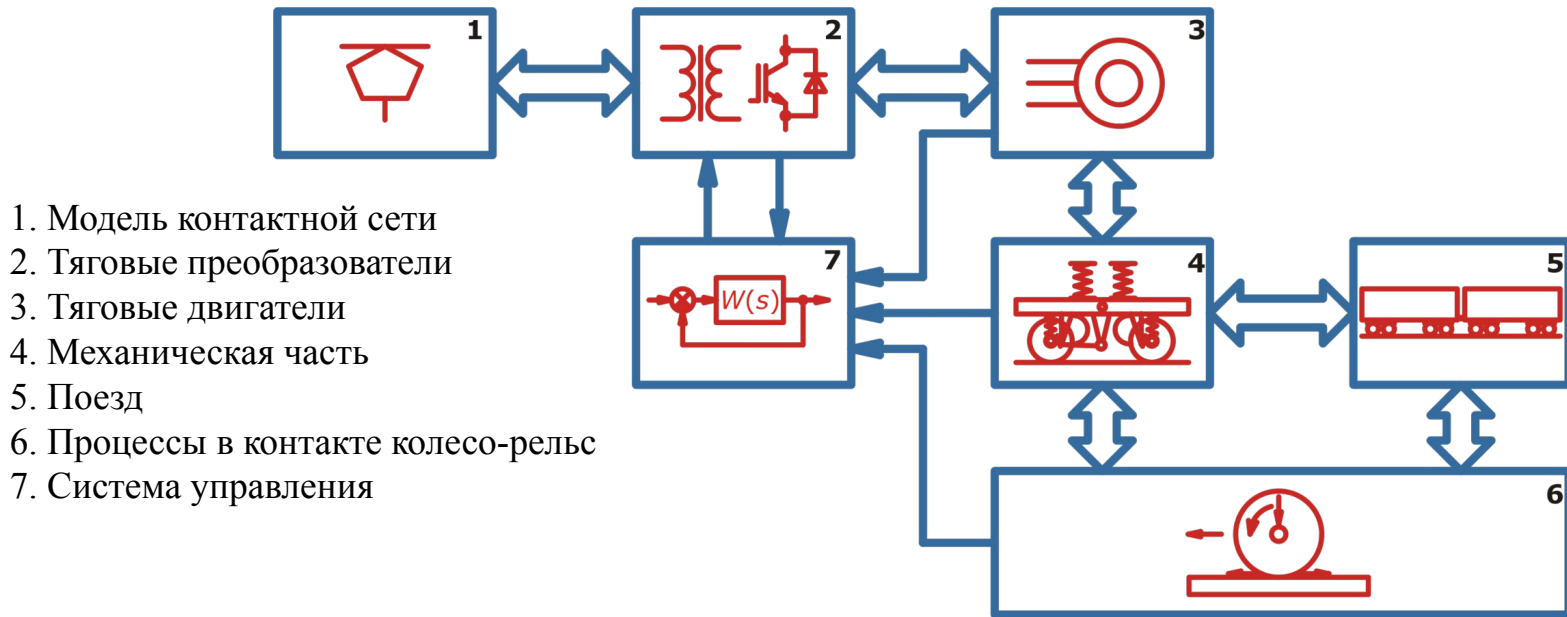


Предложен алгоритм адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью. В результате обеспечивается стабилизация значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне, близком к его номинальному значению, чем достигается повышение энергетической эффективности локомотивной тяги и существенное снижение расхода электроэнергии.

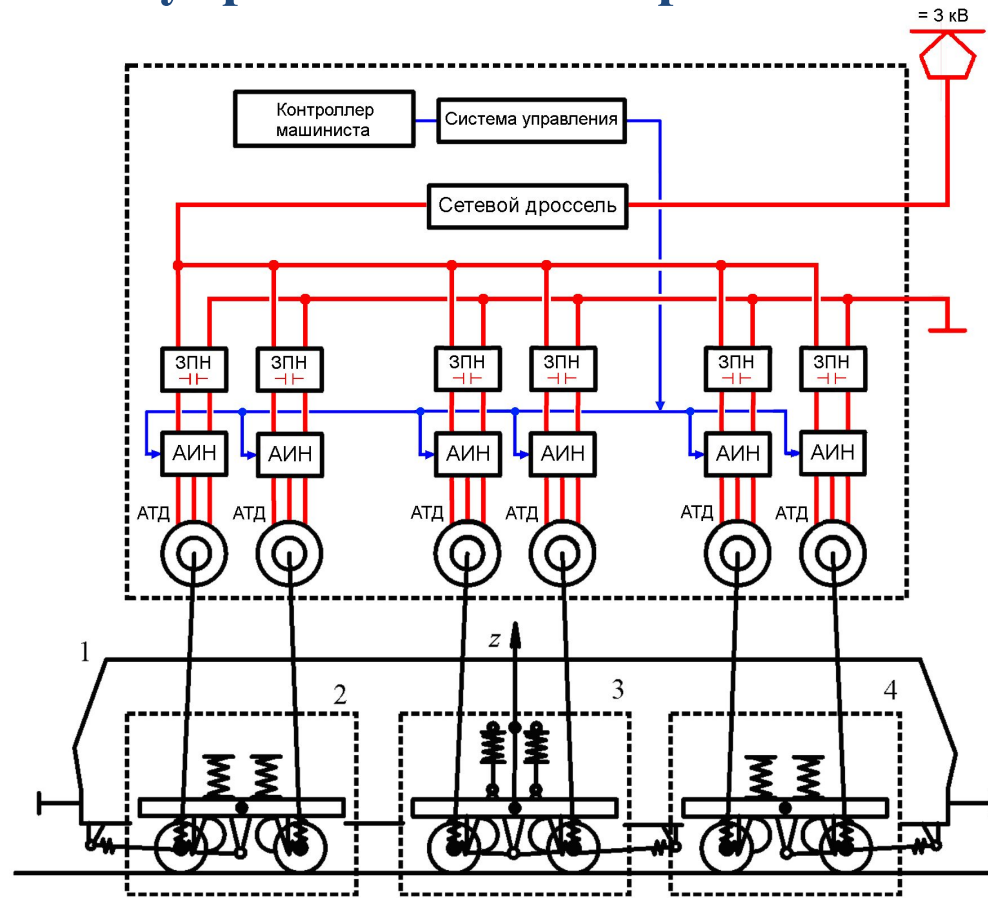


# Глава 3 «Построение компьютерных моделей электровоза и пассажирского поезда»

Для оценки энергоэффективности электровоза при применении полученного алгоритма, была создана компьютерная модель поезда. Электровоз рассматривается как управляемая электромеханическая система, которая включает механическую часть в виде системы подвижно соединенных твердых тел, электрическую часть (устройства преобразования энергии и тяговые двигатели) и систему управления (алгоритмы управления и их программная реализация). Комплексная компьютерная модель электровоза, представленная в настоящей работе, представляет собой дальнейшее развитие ранее созданных моделей. Вопросы создания компьютерных моделей локомотивов рассмотрены в работах Ю.А. Бахвалова, П.Г. Колпахчяна, Д.Ю. Погорелова, Е. М. Плохова, В.А. Симонова, В.П. Янова и других.



# Электровоз как управляемая электромеханическая система

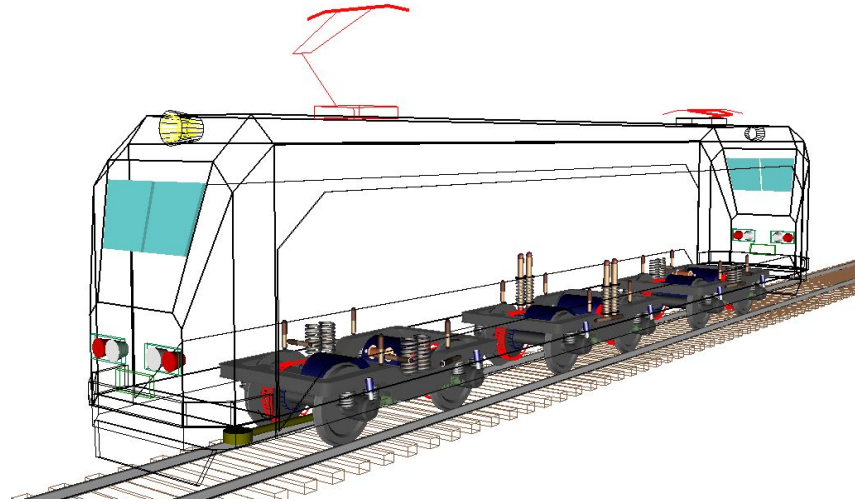


Так как моделирование выполняется с целью определения энергетических показателей, нет необходимости получать мгновенные значения токов и напряжений по всей цепи преобразования энергии. Здесь основную роль играют мощность, потребляемая электровозом; значения потребляемого тока и напряжения контактной сети; моменты тяговых двигателей.

Вычисление указанных величин возможно без учета быстропротекающих электромагнитных процессов в АТД и преобразователе электроэнергии.

Шаг моделирования в адаптированной модели – **0.01 с**, в то время как в подробной модели шаг моделирования должен быть не более **1 мкс**.

# Модель механической части электровоза ЭП20 в виде системы твердых тел



Электровоз имеет осевую формулу 2о-2о-2о. Механическая часть электровоза представлена как система взаимосвязанных твердых тел, состоящая из кузова и трех двухосных тележек. Наклонные тяги служат для передачи тяговых и тормозных усилий от рам тележек на кузов, вертикальные усилия передаются через кузовную и буксовую подвески. В общей сложности, модель состоит из 28 твердых тел, число степеней свободы модели равно 84. Дифференциальные уравнения движения получены при помощи формального метода Ньютона-Эйлера:

$$M(q)\ddot{q} + k(q, \dot{q}) = Q(q, \dot{q}) + G(q)^T \lambda,$$
$$g(q) = 0,$$

где  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  – матрицы-столбцы лагранжевых координат, скоростей и ускорений;

$M$  – матрица масс;

$k, Q$  – матрицы-столбцы гироскопических и активных сил;

$\lambda$  – вектор множителей Лагранжа, соответствующих разрезанным связям;

$g$  – уравнения связей;

$m$  – число связей;

$G = \partial g / \partial q^T = \left\{ \partial g_i / \partial q_j \right\}_{i=1, m}^{j=1, n}$  – якобиан уравнений связей.

## Подход к моделированию процессов в АТД

При оценке энергетических показателей электровоза, компьютерная модель должна быть адаптирована для нахождения следующих величин:

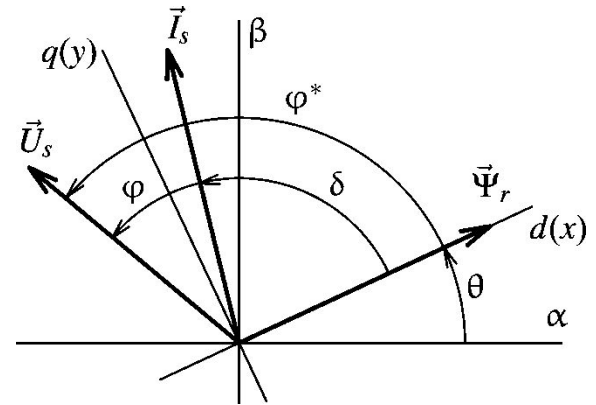
- действующих значений фазных токов и напряжений АТД;
- среднего за период питающего напряжения значения электромагнитного момента АТД;
- значения тока на токосъемнике электровоза;
- потребляемой электровозом мощности.

## Математическое описание процессов в АТД

Процессы в асинхронной машине с короткозамкнутым ротором в системе координат  $d-q$  описываются уравнениями:

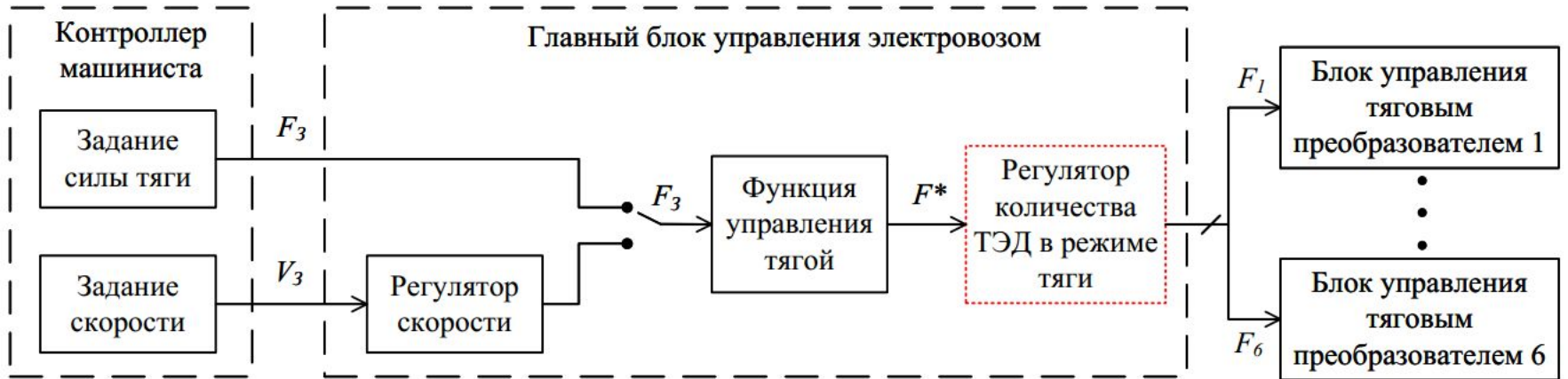
$$\begin{cases} \vec{U}_s = \vec{I}_s r_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega\vec{\Psi}_s, \\ 0 = \vec{I}_r r_r' + \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + j\omega\vec{\Psi}_r. \end{cases}$$

где  $r_s, r_r'$  – сопротивления статора и ротора,  
 $\vec{I}_r$  – вектор тока ротора,  
 $\vec{\Psi}_s$  – вектор потокосцепления статора.



Пространственное расположение векторов АТД

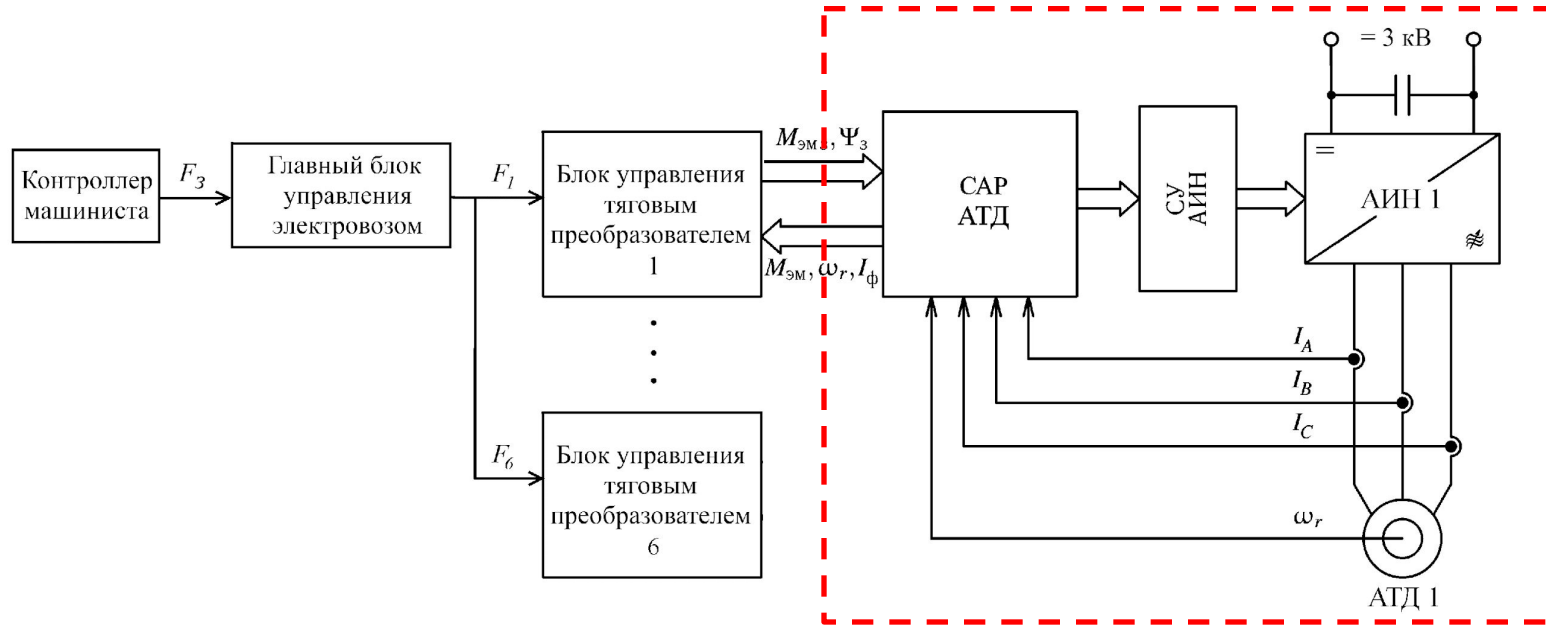
## Структурная схема управления силой тяги





# Компьютерная модель системы управления и питания АТД

Структурная схема системы управления АТД при питании от сети постоянного тока

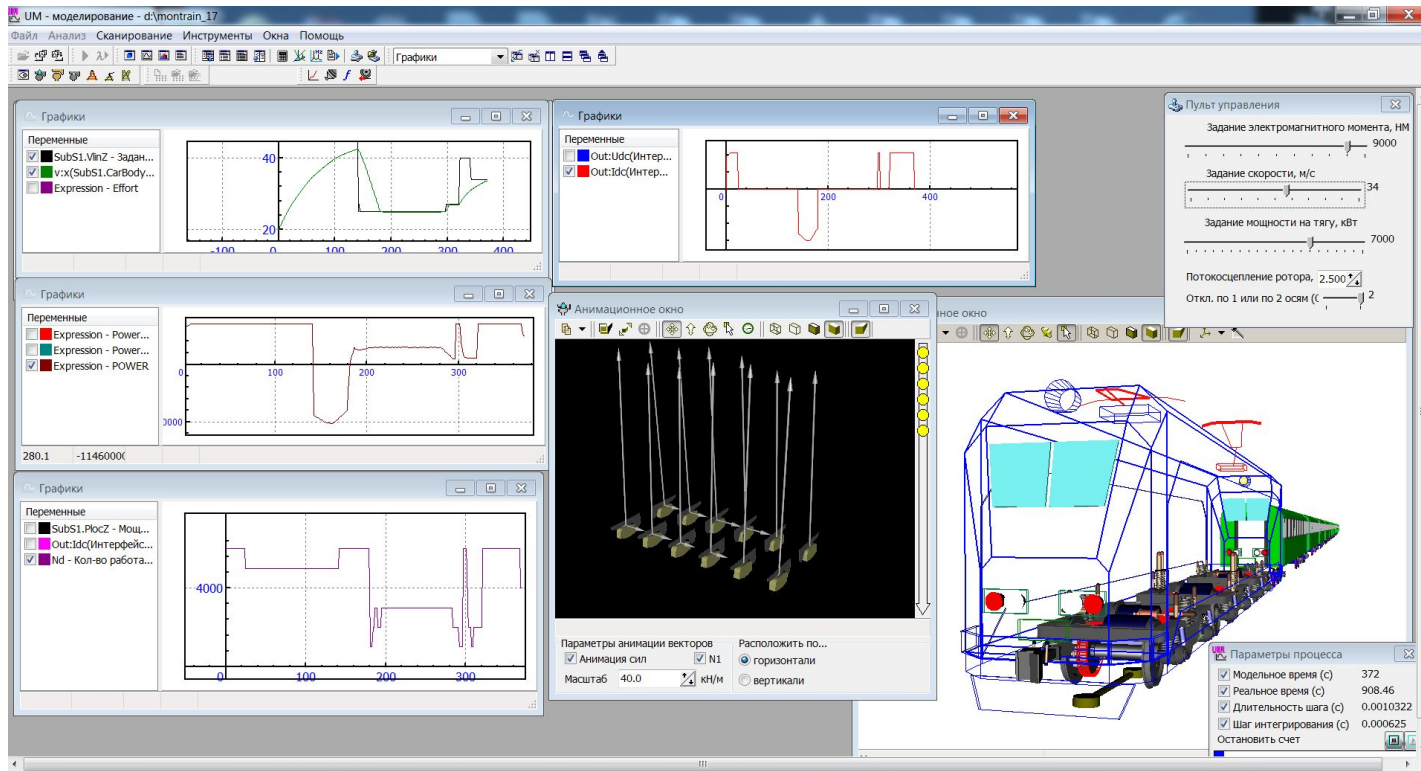


При используемом принципе регулирования потокосцепления ротора с высокой точностью стабилизируется как в установившихся, так и в переходных режимах. Поэтому при составлении упрощенной модели АТД с достаточной точностью можно считать, что потокосцепление ротора является постоянным и соответствует заданию.

При построении модели АТД, адаптированной для решения задач энергоэффективности, необходимо учитывать инерционность регулирования контура тока. В этом случае передаточная функция канала регулирования момента будет соответствовать апериодическому звену первого порядка, а составляющая тока статора по оси  $q$  изменяться пропорционально изменению электромагнитного момента

$$W_{эм}(p) = \frac{1}{T_{эм}p + 1}.$$

# Компьютерная модель поезда в ПК «Универсальный Механизм»

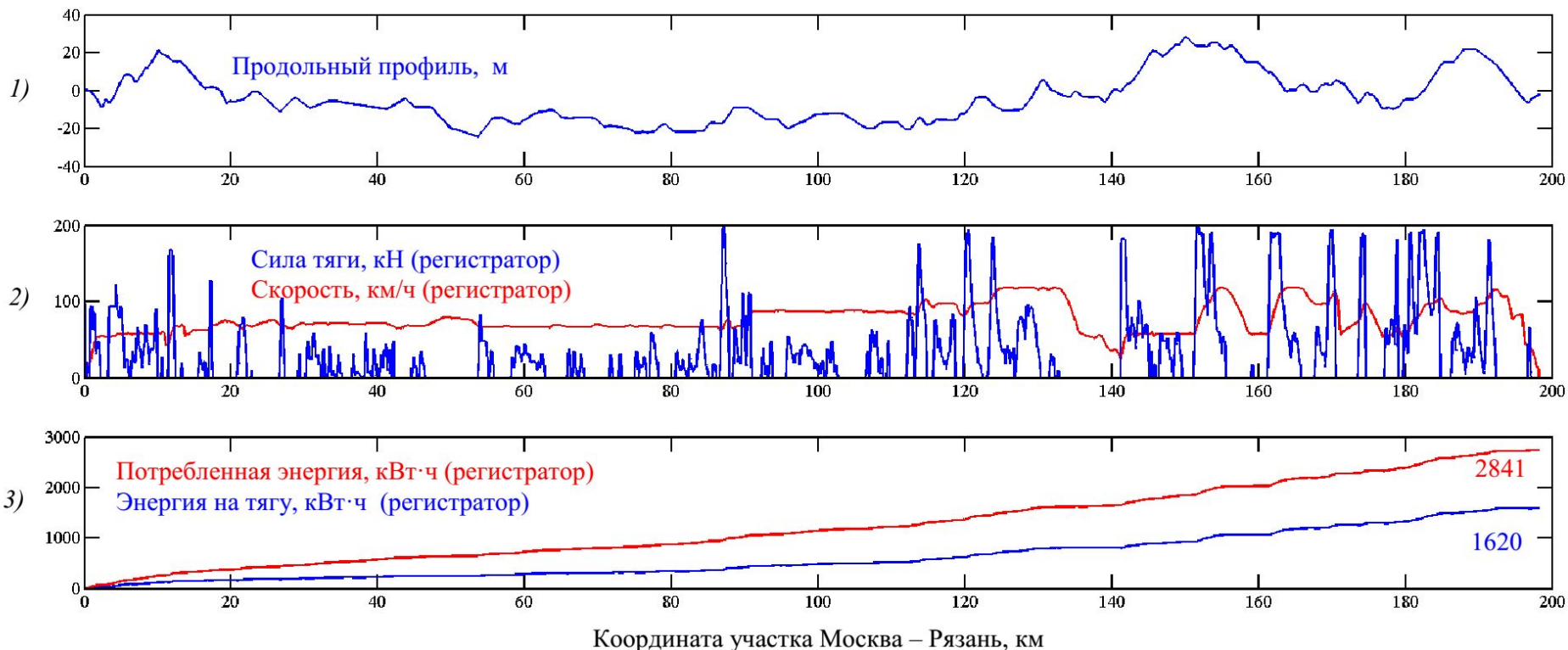


В тяге находились все шесть ТЭД, и было воспроизведено движение по участкам эксплуатации. В программу введены спрямленные профили этих участков и соблюден скоростной режим. Число вагонов выбиралось в соответствии с конкретной ситуацией, удельное сопротивление движению согласно ПТР.

**Получено, что отклонение расчетных значений потребления энергии от записей регистратора незначительно: в пределах нескольких процентов.**

# Глава 4 «Оценка энергетической эффективности электровоза в различных режимах работы при использовании предлагаемого алгоритма»

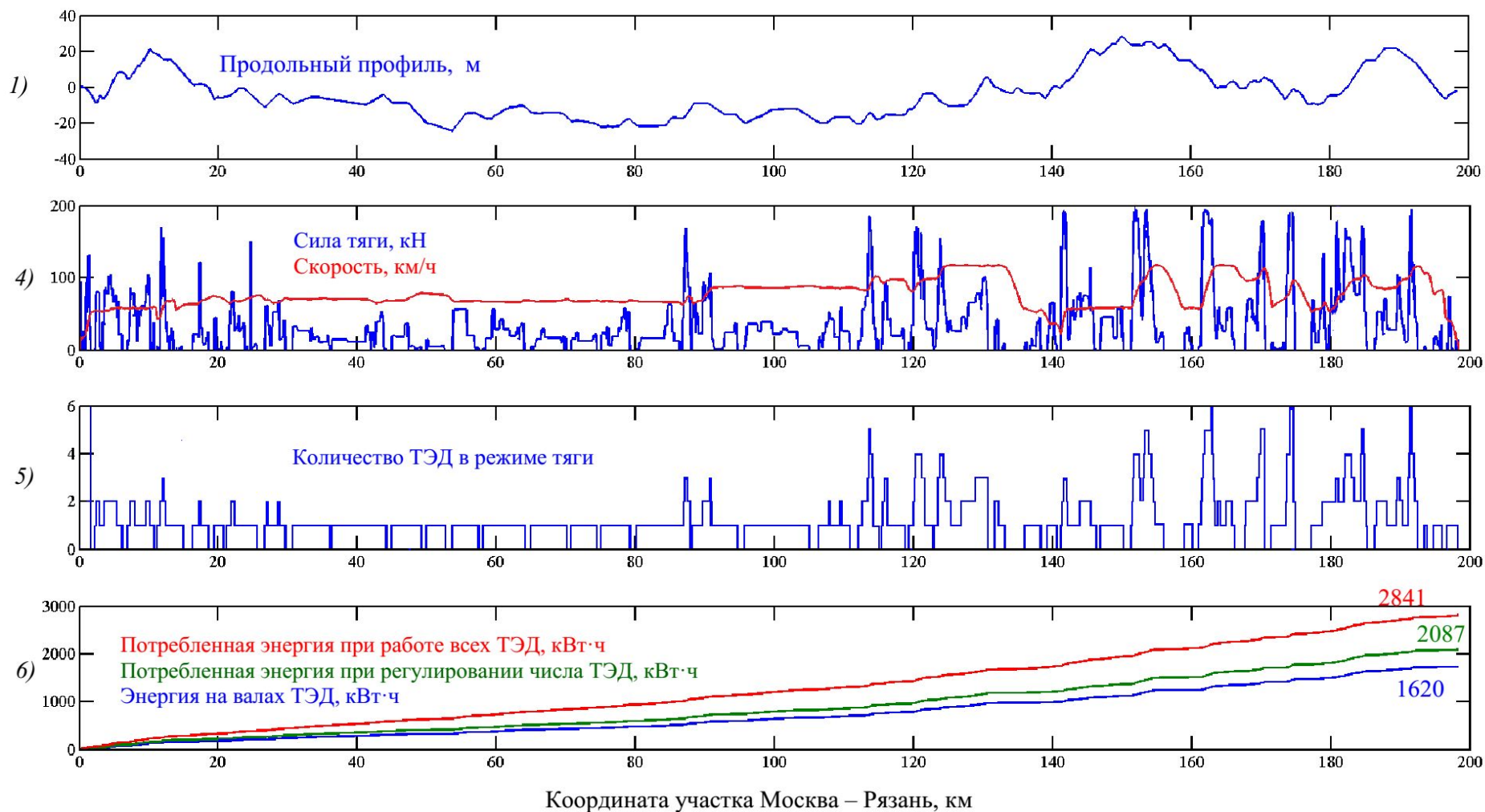
**Записи бортового регистратора ЭП20-015 07.04.2014 на участке Москва – Рязань.  
Состав 11 вагонов.**



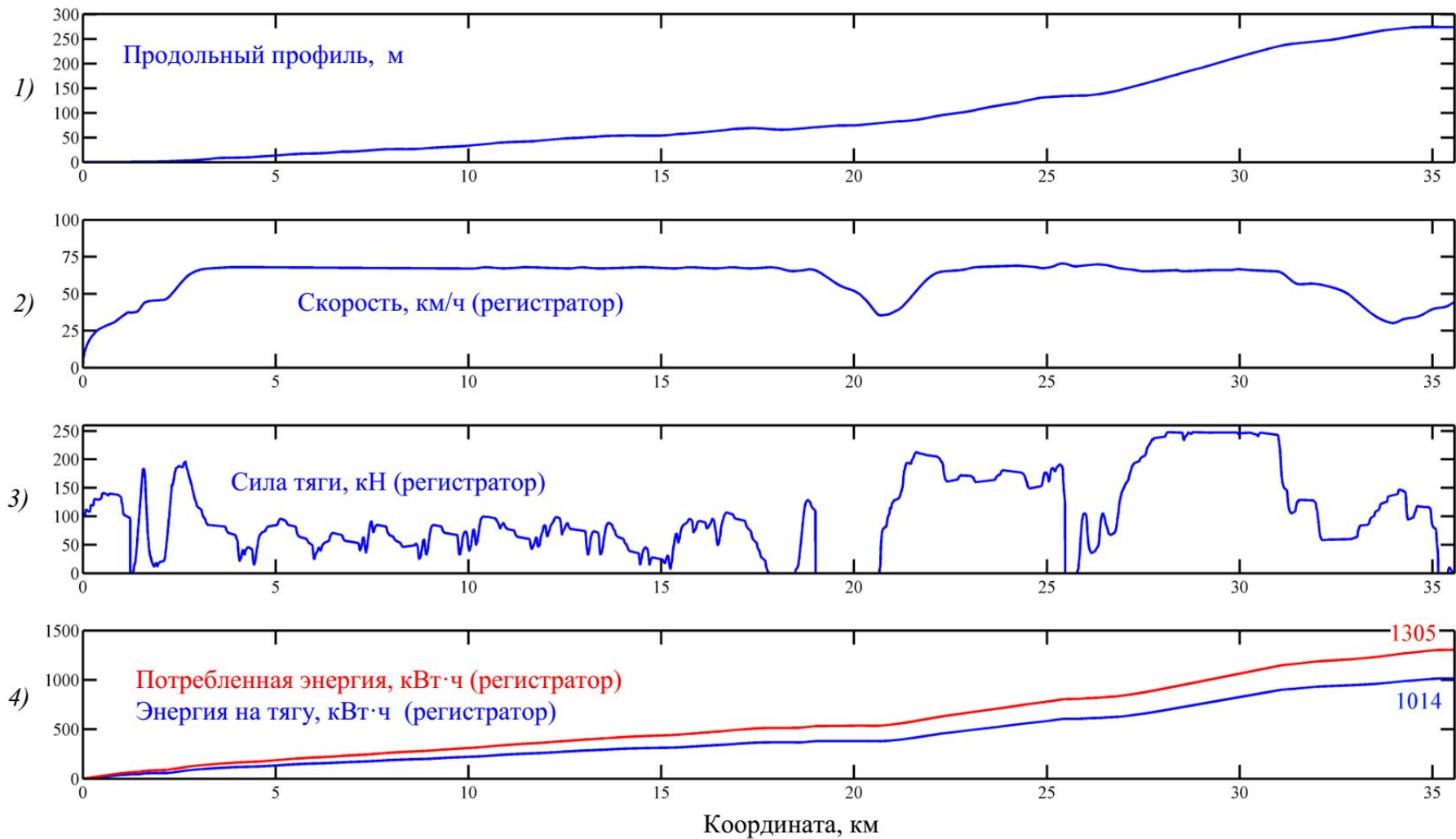
Проведем сопоставление записей регистратора электровоза и результатов моделирования. На диаграммах показаны данные, полученные при поездке электровоза ЭП20-015 07.04.2014 по участку Москва – Рязань с 11 пассажирскими вагонами.

Расчетная экономия электроэнергии составляет **25%** без отклонений от графика движения.

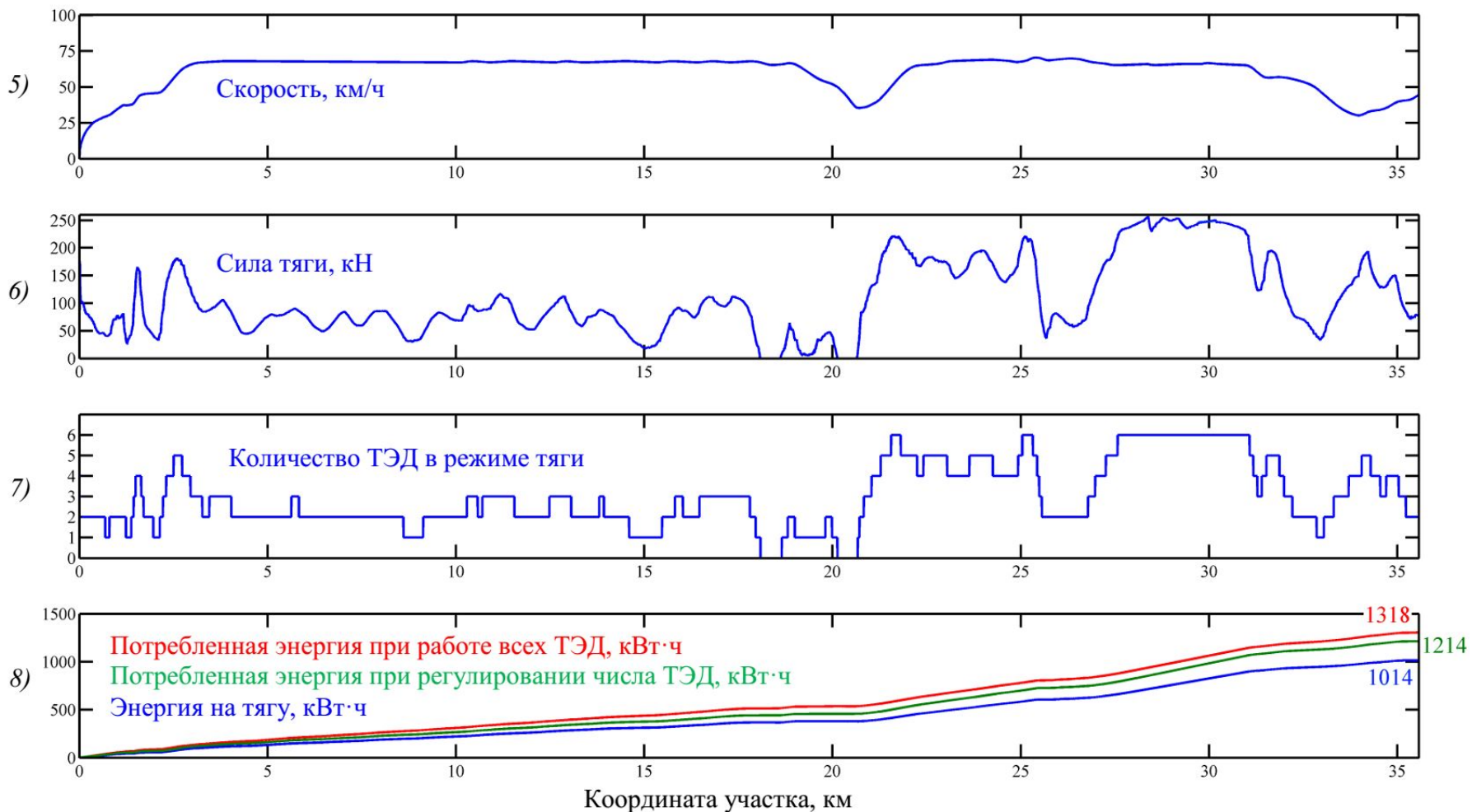
**Результаты моделирования движения поезда на профиле участка Москва – Рязань.  
Условия соответствуют поездке ЭП20-015 07.04.2014.**



**Записи бортового регистратора ЭП20-023 14.04.2014 на участке Туапсе – Перевал.  
Состав из 15 вагонов.**



**Результаты моделирования движения поезда на профиле участка Туапсе - перевал.  
Условия соответствуют поездке ЭП20-023 14.04.2014**



Расчетная экономия электроэнергии составляет **8%** без отклонений от графика движения.

ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ

ОКтябрьская ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ

ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ ЛОКОМОТИВНОЕ  
ДЕПО  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-  
ПАССАЖИРСКИЙ-МОСКОВСКИЙ

Днепропетровская ул., 2  
г. Санкт-Петербург, 191119  
Тел.: (812) 457-96-56, факс: (812) 457-96-56

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Справка по расходу электроэнергии при подконтрольной эксплуатации  
электровоза ЭП20 с поездами «Невский Экспресс».

В соответствии с телеграфным извещением №ИСХ – 15934 от 15.10.2015г. ЦЗ-С В.А. Галановича с целью снижения влияния электромагнитных помех на работу приборов безопасности работниками ООО «ПК «НЭВЗ» и Сервисного центра в период с 30.10.2015г.-15.11.2015г. производилось отключение 1-го по ходу движения ТЭД электровозов ЭП20, обращающихся с поездами «Невский Экспресс».

Проведен анализ использования электроэнергии при подконтрольной эксплуатации электровоза ЭП20 с поездами «Невский Экспресс». При следовании и одним отключенным тяговым двигателем средний расход электроэнергии за поездку составил 13186 кВтч., удельный расход составил 269,6 кВтч/изм., при выполненной работе 489ткмбр., до отключения тягового двигателя в октябре текущего года средний расход за поезду составил 13742кВтч., удельный расход составил 281,02 кВтч/изм., при этом объеме выполненной работы 489ткмбр.

Согласно показаний приборов учета расхода электроэнергии и данных маршрута машиниста, при подконтрольной эксплуатации электровоза ЭП20 с поездами «Невский Экспресс выявлена положительная динамика снижения удельного расхода на 4%

Главный инженер



А.И. Кириллов

На скоростном участке С.-Петербург – Москва проводились поездки электровоза ЭП20 с поездами «Невский Экспресс» с одним отключенным ТЭД. По информации Октябрьской ж.д., выявлена положительная динамика снижения удельного расхода электроэнергии на 4% по сравнению со штатным режимом (все шесть ТЭД в тяге).

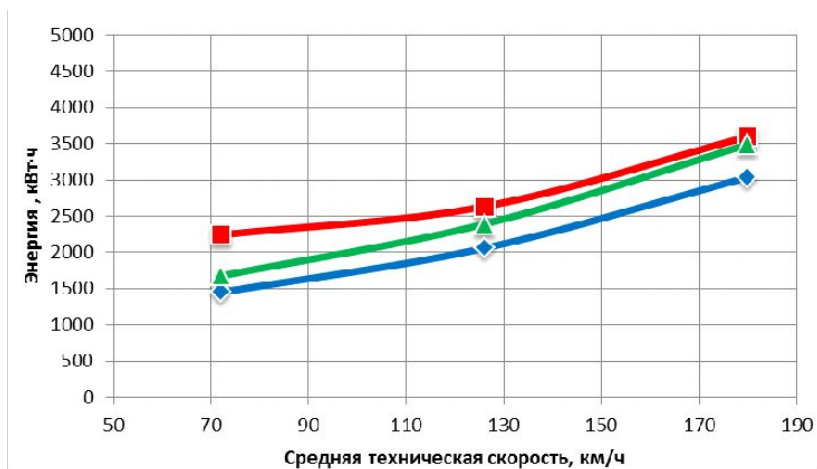
Согласно результатам компьютерного моделирования, при одном отключенном ТЭД удельный расход снижается на 3,38%, что в целом соответствует данным Октябрьской ж.д. Если же применить предлагаемый алгоритм, то удельный расход за поездку в том же скоростном режиме снизится на 6,6%.

# Оценка сокращения энергопотребления

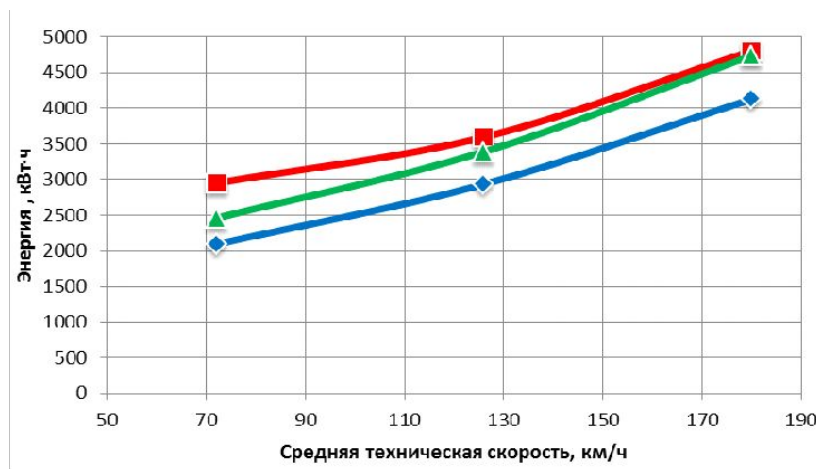
Согласно «Методике расчета индикатора энергоэффективности электровоза», были взяты условные профили следующих типов: I-II тип, равнинный, с уклонами не более 6‰; III тип, холмистый, с уклонами до 9‰; IV тип, горный, с уклонами до 11‰.

Было выполнено моделирование движения пассажирского поезда по этим участкам как при всех шести включенных ТЭД, так и при переменном числе работающих ТЭД. Число вагонов было принято равным 11 (зимнее расписание) и 17 (летнее расписание).

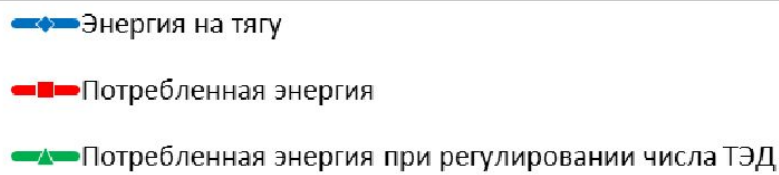
## Расход электроэнергии при движении по участку с условным профилем



11 вагонов

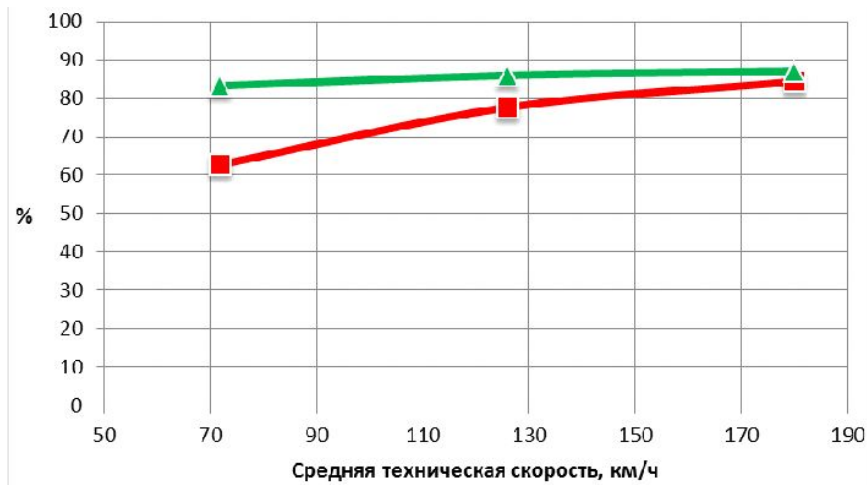


17 вагонов

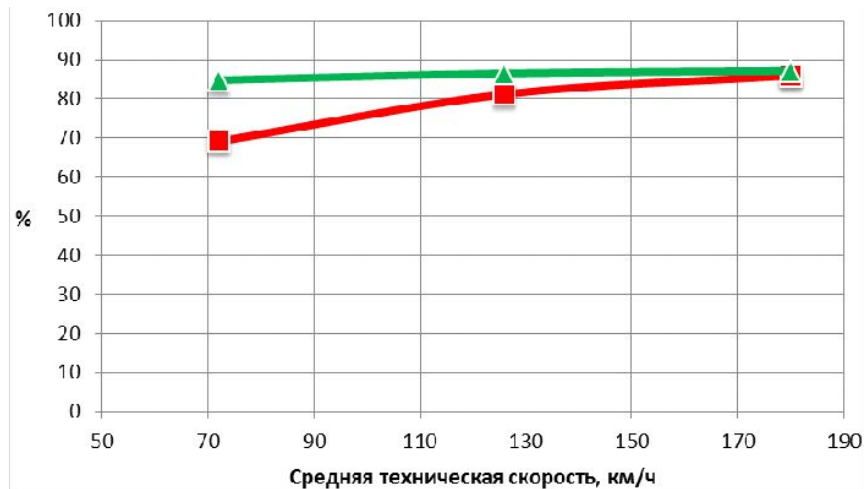




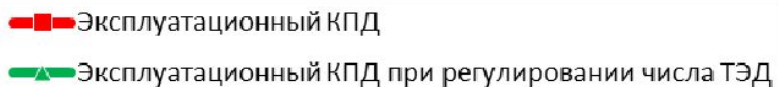
## Эксплуатационный КПД при движении по участку с условным профилем



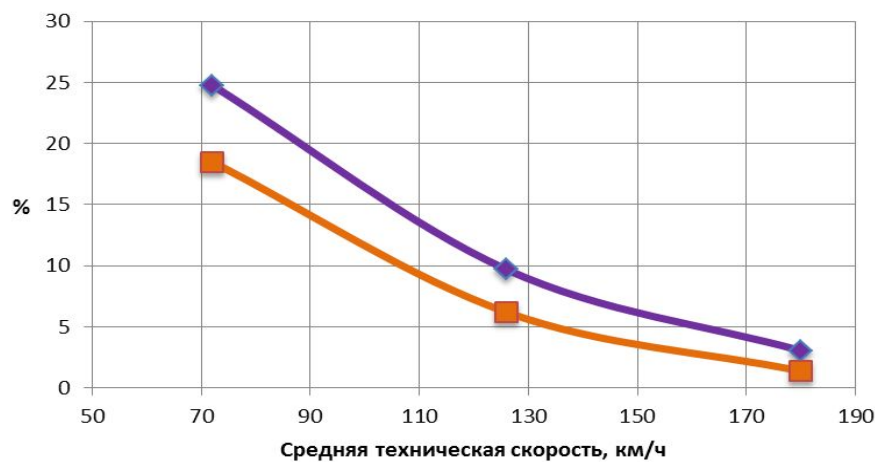
11 вагонов



17 вагонов



## Относительная экономия электроэнергии при регулировании числа ТЭД



11 вагонов

17 вагонов

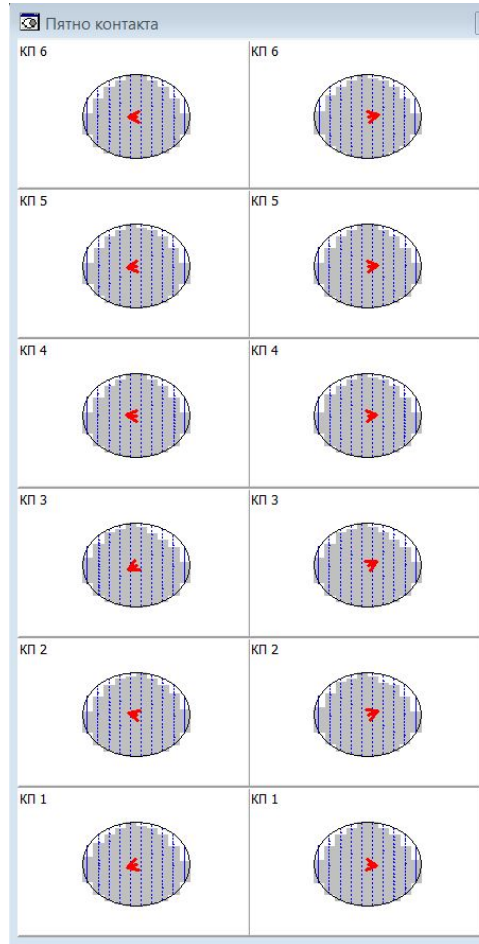
## Глава 5 «Контроль состояния контакта колесо-рельс и доработка вспомогательного привода при реализации энергоэффективного алгоритма»

Рассмотрены вопросы, связанные с практической реализацией энергоэффективного алгоритма. Основные требования таковы:

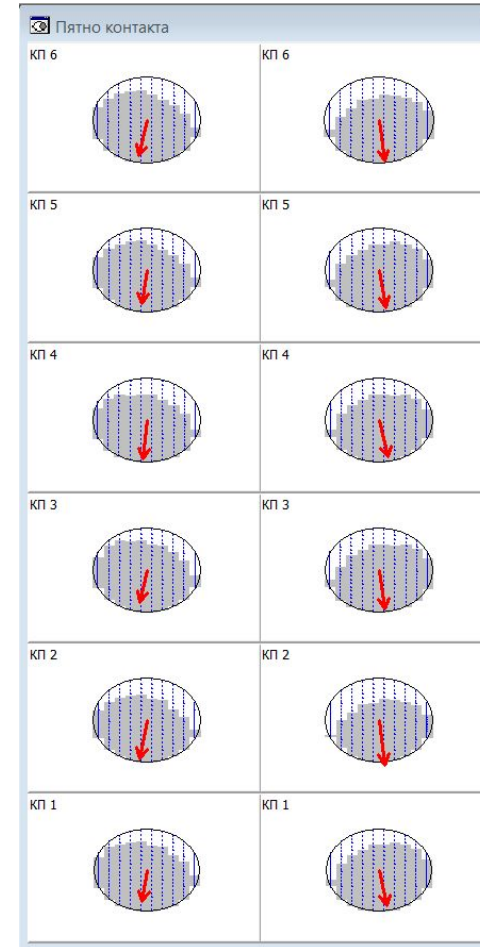
1. недопущение срыва колесных пар в боксование при возрастании нагрузки на подключаемые ТЭД (контроль состояния контакта колесо-рельс);
2. недопущение возникновения дополнительных продольно-динамических нагрузок по длине поезда (плавное переключение числа ТЭД);
3. выравнивание ресурса всех ТЭД локомотива;
4. недопущение перегрева ТЭД, должны подключаться в работу ТЭД с минимальной температурой, а отключаться – ТЭД с максимальной температурой;
5. необходимо контролировать частоту вращения ТЭД, его температуру, ток и напряжение.

# Состояние контакта колесо-рельс при реализации энергоэффективного алгоритма

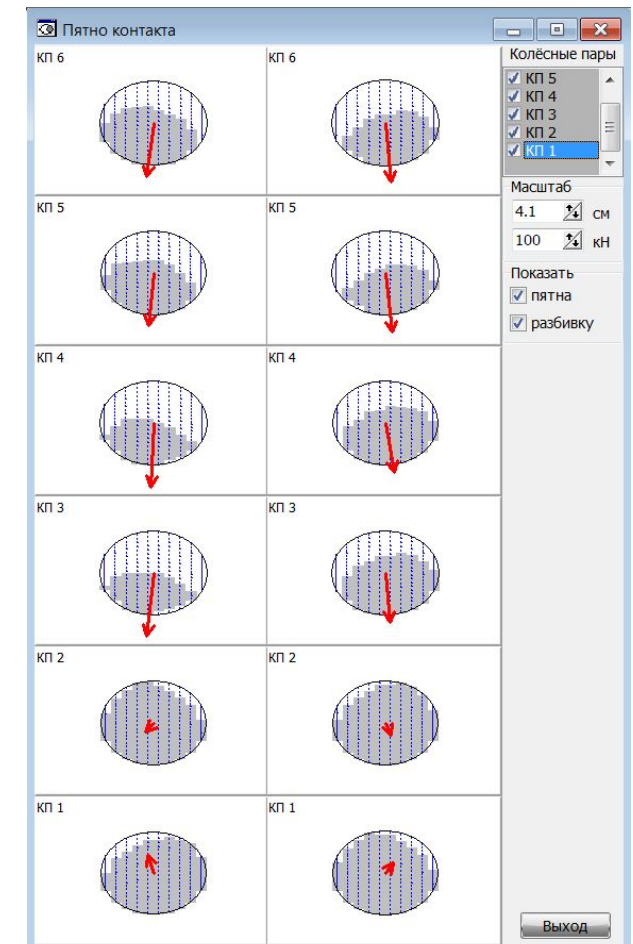
Движение на выбеге



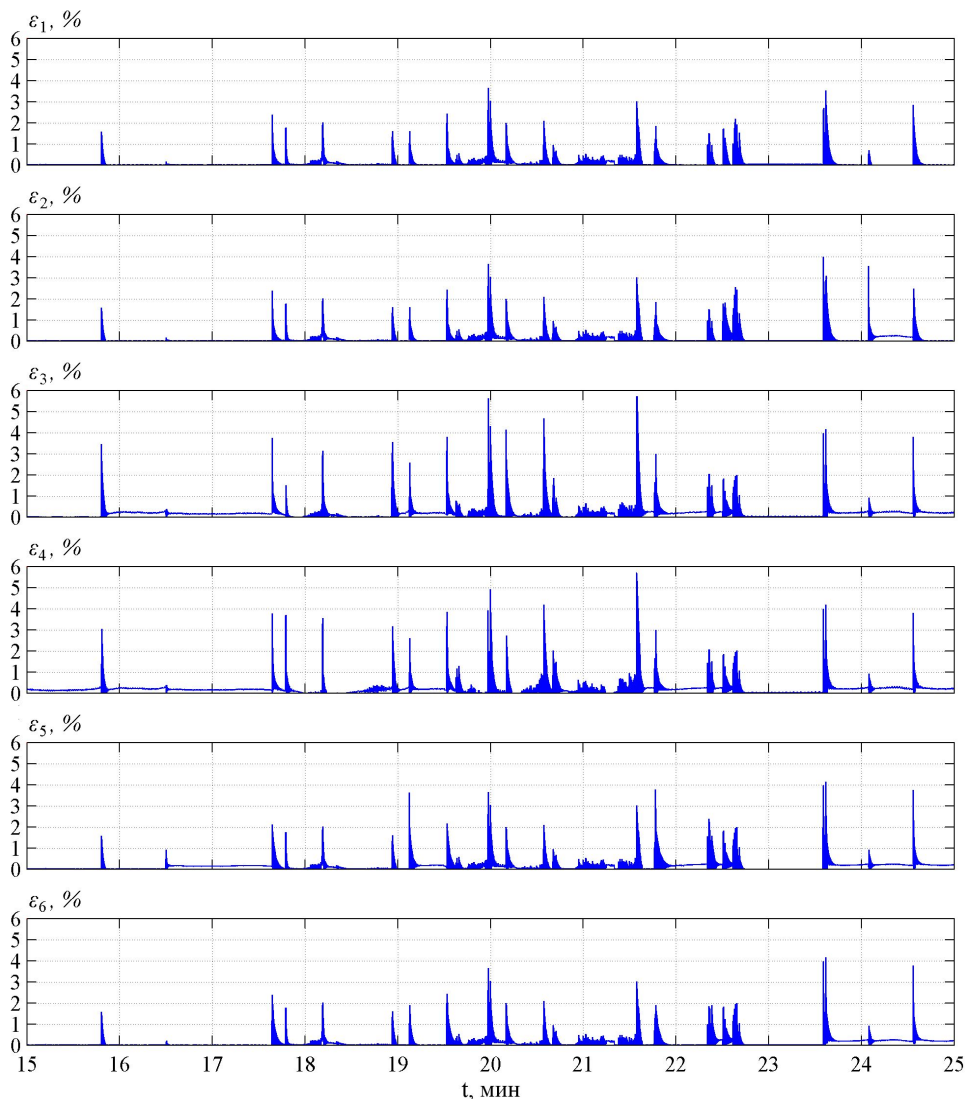
Тяга 60% на всех осях



Тяга 60% на четырех осях



## Относительные скорости скольжения осей электровоза по результатам моделирования на участке Туапсе – Горячий Ключ



На рисунке приведены относительные скорости скольжения осей электровоза  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6$ , полученные при моделировании движения на участке Туапсе – Горячий Ключ. Приведенные результаты относятся к промежутку времени с 15-й по 25-ю минуту, когда электровоз начинает двигаться на перевал, нагрузка существенно возрастает, и в работу подключаются все тяговые двигатели.

Как видно, скольжение не превышает 5...6% во время процесса переключения числа ТЭД. Скольжение происходит кратковременно и не приводит к боксованию. Разработанная в главе 3 компьютерная модель позволяет в дальнейшем исследовать поведение системы при плохих условиях сцепления, а так же при различных условиях движения поезда.

# Заключение. Основные выводы

1. Путем статистической обработки массивов записей бортового регистратора, установлена зависимость показателей энергоэффективности электровоза от его скорости, профиля пути и составности поезда в различных условиях движения. Найдена зависимость КПД электровоза от реализуемой мощности, построена аналитическая аппроксимация полученной зависимости.
2. Разработан алгоритм адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока. Алгоритм обеспечивает стабилизацию мгновенных значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне его номинального значения, имеющего место при полной нагрузке. Предложена структура системы управления тяговым приводом, включающая этот алгоритм.
3. Создана полноразмерная компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы, причем реализовано индивидуальное (поосное) регулирование силы тяги. Построена компьютерная модель пассажирского поезда, включающего электровоз и состав, позволяющая воспроизводить режим ведения поезда по конкретному участку и рассчитывать основные показатели энергопотребления.
4. Выполнено компьютерное моделирование движения пассажирского поезда по типовым участкам условных профилей длиной около 150 км, как при всех работающих тяговых двигателях, так и с использованием предлагаемого алгоритма управления энергетической эффективностью путём регулирования мощности и числа тяговых двигателей. Получено, что при движении со скоростью 72 км/ч экономия электроэнергии может составить 18...25%, при скорости 126 км/ч – 6...10%, на высокой скорости (180 км/ч) – в пределах 3%.

## Заключение. Основные выводы

5. Достоверность результатов, полученных путем компьютерного моделирования, подтверждена тем, что для конкретных участков расхождение по энергопотреблению от записей бортового регистратора не превышает нескольких процентов (при всех работающих тяговых двигателях), что дает возможность использовать результаты компьютерного моделирования для оценки энергопотребления. Кроме того, при отключении одного ТЭД электровоза ЭП20 с поездами «Невский Экспресс» выявлена положительная динамика снижения удельного расхода электроэнергии на 4%, тогда как по результатам компьютерного моделирования снижение расхода оценивалось в 3,38%.
6. Сформулированы дополнительные требования, которые должны быть соблюдены при использовании предлагаемого алгоритма управления энергетической эффективностью. Изучены условия работы в контакте «колесо-рельс» для всех колесных пар, свидетельствующие об отсутствии срывов в буксование при отключении/подключении тяговых двигателей.
7. Сформулированы предложения по доработке схемы вспомогательного привода для обеспечения поканальной регулировки скорости вращения мотор-вентиляторов.
8. Предлагаемый энергоэффективный алгоритм (система регулирования числа тяговых двигателей в зависимости от мгновенной мощности) может применяться и на грузовых электровозах. Поскольку при грузовых перевозках нагрузка крайне неравномерная, то ожидается значительный экономический эффект.



**Спасибо за внимание!**

**Зарифьян Александр Александрович**

**+7-904-34-79-483**

**[zar.plgrph@gmail.com](mailto:zar.plgrph@gmail.com)**