EDN OVPSLY DOI 10.5281/zenodo.14514892
УДК 004.891.2:311.2: 629.423

МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА НЕБАЛАНСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ

© 2024 ***Давыдов А.И., Каштанов А.Л., Подгорная С.О.***

Приведено описание, разработанной в Омском государственном университете путей сообщения методологии анализа небаланса электрической энергии на тягу поездов на основе статистической информации автоматизированных систем. Методология может быть реализована при создании системы поддержки принятия решений в области анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов.

Ключевые слова: эксплуатационные показатели, небаланс электроэнергии, анализ, коэффициенты влияния, ожидаемое значение величины.

Введение. В соответствии с ГОСТ 32895-2014 небалансом электрической энергии на тягу поездов называют разницу между объемом расхода электроэнергии, относимого на тягу поездов по показаниям счетчиков тяговых подстанций (с включением соответствующей доли – от общего потребления электроэнергии – технических потерь в тяговых трансформаторах и линиях электропередач до границы балансовой принадлежности) и объемом расхода электроэнергии по показаниям счетчиков электроподвижного состава.

На практике же в настоящий момент значение небаланса электроэнергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока определяется без учета потерь электроэнергии в понизительных трансформаторах, а на полигоне переменного тока при наличии учета электроэнергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций небаланс определяется без потерь в тяговых трансформаторах.

Небаланс электроэнергии включает в себя составляющую реальных потерь электроэнергии – технологическую, и условную составляющую – так называемые коммерческие потери [1-3].

Небаланс включает в себя технологическую и «коммерческую» составляющие. Технологическая составляющая включает потери электроэнергии при ее транспортировке от вводов тяговых подстанций до электроподвижного состава, а также погрешности приборов учета. Так называемая «коммерческая» составляющая не связана с реальными потерями электрической энергии и обусловлена в первую очередь следующими причинами: низким качеством технических средств учета электроэнергии, методическими ошибками и погрешностями при определении интегральных значений небаланса в границах расчетного участка (рис. 1).

В последнее десятилетие на сети железных дорог проводилось большое количество организационно-технических мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения и тягового подвижного состава, в результате которых удалось добиться двукратного снижения среднего уровня небаланса электроэнергии на тягу поездов на сети железных дорог с 14,7 % в 2005 году до 9,3 % в 2023 году.

Однако, не смотря на довольно низкий среднегодовой уровень небаланса по сети железных дорог, на отдельных железных дорогах в отдельные месяцы могут происходить значительные его колебания как в сторону значительного увеличения, так и в сторону резкого снижения, вплоть до парадоксальных отрицательных значений.

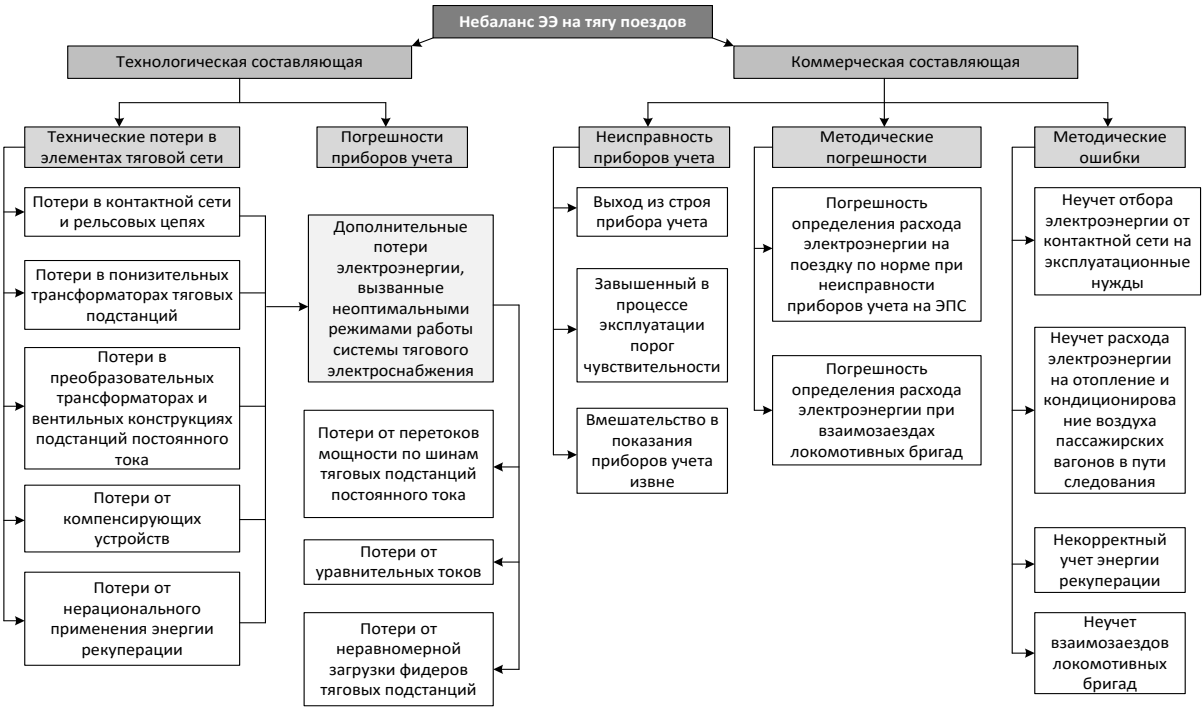

Рис. 1. Структурная схема Фурье-спектрометра с интерферометром TWINS при максимальной толщине блока Б

Такие колебания могут быть вызваны как объективными причинами, например, изменением структуры грузопотоков, состава парка подвижного состава, климатических условий и др., так и субъективными: неудовлетворительное состояние объектов системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава, неэффективное управление режимами их работы, неисправность приборов учета электроэнергии и несанкционированное вмешательство в их работу, методические погрешности и методические ошибки при расчете уровня небаланса и др.

В этой связи необходим четкий механизм определения ожидаемых значений небаланса на тот или иной период времени для различных железных дорог, который бы учитывал все особенности этих железных дорог.

Основная часть. Анализ специфики определения ожидаемых значений небаланса позволил сформировать перечень требований к выбору метода расчета ожидаемого значения, которые заключаются в следующем:

1) при разработке расчетной модели участие эксперта должно быть сведено к минимуму;

2) метод расчета должен иметь возможность работать с зашумленными данными;

3) процесс расчета ожидаемых значений должен быть понятен специалисту, использующему метод;

4) сложность и время реализации должны быть минимальными, метод должен быть легко автоматизируемым;

5) метод должен поддерживать возможность корректировки модели для учета дополнительного набора факторов, оказывающих воздействие на систему.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ методов по указанным выше критериям.

Таблица 1. Результаты сравнительного анализа методов прогнозирования

Метод	Номер требования				
	1	2	3	4	5
Экстраполяционные методы	–	+	+	+	+
Регрессионные методы	–	–	+	+	+
Экспертные методы	–	–	+	–	–
Нейронные сети	+	–	–	–	+
Нейро-нечеткие системы	+	+	–	–	+

Учитывая достоинства и недостатки рассмотренных методов и предъявляемые к ним требования, для решения задачи поиска ожидаемого значения небаланса электроэнергии на тягу поездов наиболее подходящими являются методы экстраполяции временных рядов, которые заключаются в распространении тенденций, установленных в прошлом, на будущий период, и регрессионные методы, также решающие задачу экстраполяции на основе исследования взаимного влияния показателей.

Для определения ожидаемого значения показателя были рассмотрены следующие:

1) абсолютная величина небаланса электрической энергии на тягу (П1);

2) относительная величина небаланса электрической энергии на тягу (П2);

3) отношение абсолютной величины небаланса электрической энергии на тягу к перевозочной работе (П3).

На следующем этапе для каждого показателя П1-П3 были построены корреляционные матрицы от следующих показателей:

– расход электроэнергии по приборам учета тяговых подстанций;

– расход по приборам учета электроподвижного состава;

– расход локомотивных бригад железной дороги на участках работы «чужой» железной дороги;

– расход локомотивных бригад «чужой» железной дороги на участках исследуемой железной дороги;

– фактический и плановый возврат электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении;

– расход электроэнергии на нужды предприятий по ремонту и техническому обслуживанию локомотивов;

– прочий расход электроэнергии из тяговой сети;

– техническая скорость движения;

– коэффициент участковой скорости;

– величина перевозочной работы по видам движения;

– резервный пробег локомотивов;

– простой локомотивов в рабочем состоянии в ожидании работы;

– нагон опоздания пассажирских поездов;

– нагрузка на ось грузового вагона состава;

– температура наружного воздуха.

В связи с большим объемом матриц приведем в качестве примера корреляционную матрицу показателей П1-П3 от величины пробега локомотивов резервом (табл. 2).

Таблица 2. Значения R^2 для регрессионных зависимостей небаланса от пробега локомотивов резервом по полигону железной дороги

Железная дорога	Полигон	Коэффициент детерминации R^2								
		2013 г.			2014 г.			2015 г.		
		П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3
ЗСЖД	пост. ток	0,913	0,663	0,649	0,600	0,569	0,842	0,874	0,652	0,914
	перем. ток	0,927	0,426	0,649	0,703	0,379	0,910	0,800	0,495	0,784
ЮВЖД	пост. ток	0,787	0,712	0,820	0,786	0,446	0,927	0,868	0,627	0,925
	перем. ток	0,828	0,527	0,600	0,731	0,612	0,882	0,828	0,352	0,927
СКЖД	пост. ток	0,586	0,588	0,895	0,800	0,656	0,651	0,623	0,458	0,898
	перем. ток	0,895	0,500	0,817	0,912	0,682	0,891	0,694	0,497	0,853
ВСЖД	перем. ток	0,617	0,435	0,847	0,911	0,386	0,667	0,836	0,557	0,926

Согласно данным (табл. 2) пробег локомотивов резервом оказывает значительное влияние на величину небаланса по той же причине, что и время простоя локомотивов в рабочем состоянии в ожидании работы.

Результаты проведенных обширных исследований по выявлению факторов, оказывающих влияние на небаланс электрической энергии на тягу поездов, с помощью методов корреляционного регрессионного анализа позволили определить список указанных факторов:

– величина перевозочной работы в структурном подразделении;

– доля перевозочной работы в грузовом движении;

– техническая скорость движения в грузовом, пассажирском и хозяйственном движении;

– коэффициент участковой скорости в грузовом, пассажирском и хозяйственном движении;

– масса грузового, пассажирского и хозяйственного поезда;

– нагрузка на ось грузового вагона в грузовом и хозяйственном движении;

– доля порожнего пробега грузовых вагонов;

– время простоя локомотивов в рабочем состоянии в ожидании работы;

– пробег локомотивов резервом;

– усредненный индикатор энергоэффективности электровоза;

– температура атмосферного воздуха.

Анализ различных зависимостей показателей П1 – П3 (абсолютный небаланс, относительный небаланс и отношение величины небаланса к величине перевозочной работы) и указанных факторов показал, что в большинстве случаев максимальный коэффициент корреляции выявлен для зависимостей показателя П3. Именно его целесообразно использовать для построения регрессионных зависимостей ожидаемой величины небаланса от влияющих факторов.

Для учета влияния изменения эксплуатационных факторов на величину удельного небаланса (отношение величины небаланса и объема перевозочной работы) целесообразно составлять регрессионные зависимости:

$$\Delta w = \sum_{i=1}^{n} \beta_i X_i ,$$

где Δw – ожидаемая величина небаланса;

β_i – коэффициенты влияния эксплуатационных факторов и показателей энергопотребления;

X – величина показателя из списка, приведенного выше, в рассматриваемом периоде.

Проведенные исследования позволили определить средние значения коэффициентов влияния, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты влияния факторов на значение небаланса

№ п/п	Влияющий фактор	Значение коэффициента влияния (β_i)	
		Пост. ток	Перем. ток
1	Средняя масса поезда		
	в грузовом движении	0,001421	0,00237
	в пассажирском движении	-0,000630	-0,00055
2	Средняя техническая скорость		
	в грузовом движении	0,4931	0,38794
	в пассажирском движении	-0,0340	0,00875
3	Средний коэффициент участковой скорости в грузовом движении	-1,788	-2,0782
4	Удельная рекуперация	0,3496	0,17952
5	Доля работы ЭПС в грузовом виде движения	0,1066	0,08795
6	Усредненный индикатор энергоэффективности электровозов	-2,355	-1,74562
7	Перевозочная работа	$5{,}826 \cdot 10^{-7}$	
8	Средняя нагрузка на ось в грузовом движении	0,7677	
9	Порожний пробег вагонов	-0,1768	
10	Простой ЭПС в ожидании работы без локомотивной бригады	$9{,}760 \cdot 10^{-5}$	
11	Пробег ЭПС при следовании резервом	0,01037	
12	Время нагона опоздания пассажирских поездов	$8{,}1 \cdot 10^{-4}$	
13	Средняя температура атмосферного воздуха	-0,00584	

Выводы. Коэффициенты влияния целесообразно периодически пересчитывать с целью учета изменения факторов, которые на данном этапе невозможно учесть в силу отсутствия возможности объективной оценки значений.

Рассмотренный подход может быть использован при проведении анализа изменения небаланса электрической энергии на уровне структурного подразделения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Черемисин, В. Т. Контроль достоверности учета и потерь электрической энергии в сетях железнодорожных узлов / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Экономия топливно-энергетических ресурсов на железных дорогах - текущие и перспективные задачи : Доклады и тезисы, представленные на конференцию: Сетевая научно-техническая практическая конференция, Москва, Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ, 21–22 июня 2000 года / Министерство путей сообщения Российской Федерации, Государственное Унитарное Предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта"; Центральное правление Российского инженерно-технического Общества железнодорожников. – Москва, Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ: Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2000. – С. 53-57. – EDN YMGBWH.
2. Каштанов, А. Л. Новые подходы к исследованию проблемы небаланса электроэнергии на тягу поездов / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков // Известия Транссиба. – 2017. – № 2(30). – С. 77-87. – EDN ZWQAGP.
3. Комяков, А. А. Оценка влияния межпоездного интервала на потери электроэнергии в тяговой сети с применением методов имитационного моделирования / А. А. Комяков, М. М. Никифоров, А. И. Шкулов // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрического транспорта : Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения д.т.н., профессора, академика Российской академии транспорта В.П. Михеева, Омск, 25–27 октября 2023 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 123-131. – EDN GPRAGH.

Поступила в редакцию 24.09.2024 г., рекомендована к печати 14.10.2024 г.

METHODOLOGY FOR ANALYZING THE IMBALANCE OF ELECTRICAL ENERGY FOR TRAIN TRACTION

Davydov A.I., Kashtanov A.L., Podgornaia S.O.

A description is given of the methodology developed at the Omsk State Transport University for analyzing the imbalance of electrical energy on train traction based on statistical information from automated systems. The methodology can be implemented when creating a decision support system in the field of analysis and forecasting of fuel and energy resources consumption for train traction.

Keywords: operational indicators, power imbalance, analysis, influence coefficients, expected value.

Давыдов Алексей Игоревич
кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»,
Российская Федерация, г. Омск.
E-mail: davydovai@bk.ru

Davydov Aleksei Igorevich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Security of the Omsk State Transport University,
Russian Federation, Omsk.

Каштанов Алексей Леонидович
кандидат технических наук, директор Института автоматики, телекоммуникаций и информационных технологий ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»,
Российская Федерация, г. Омск.
E-mail: al.kashtanov@mail.ru

Kashtanov Aleksei Leonidovich
Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute of Automation, Telecommunications and Information Technology of the Omsk State Transport University
Russian Federation, Omsk.

Подгорная Светлана Олеговна
кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и компьютерной графики ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»,
Российская Федерация, г. Омск.
E-mail: davydovai@bk.ru

Podgornaia Svetlana Olegovna
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Informatics and Computer Graphics of the Omsk State Transport University,
Russian Federation, Omsk.