

М. В. Ярославцев

(г. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет)

## **РАСЧЕТ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА СО СТАЦИОНАРНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ**

*Предложено применение стационарных накопительных постов в составе тяговых сетей городского электротранспорта с целью увеличения длины межподстанционных зон при строительстве новых линий. Предложена конструкция накопительного поста. С помощью разработанной математической модели тяговой сети определены его основные характеристики.*

*Application of stationary energy storage posts in the traction networks is proposed to enlarge contact line section length between traction substations for the newly constructed lines. Design of the storage post is discussed. Its main properties are evaluated using proposed traction network model.*

*Ключевые слова: тяговая сеть, межподстанционная зона, троллейбус, потребление энергии, накопитель энергии.*

*Keywords: traction network, traction substation distance, trolleybus, energy consumption, energy storage.*

Активный рост городской территории, повышение связности улично-дорожной сети и изменение преобладающих направлений пассажирских потоков создают потребность в развитии сетей городского электрического транспорта, как более производительного его вида. Однако, обладая меньшими эксплуатационными затратами из-за низкой стоимости потребляемых энергетических ресурсов, электрифицированный транспорт требует высоких капитальных вложений в строительство новых линий. Одной из основных причин относительно высокой начальной стоимости линейной инфраструктуры городского электротранспорта является потребность в организации систем электроснабжения. Как правило, через каждые 1 – 3 км является необходимым строительство тяговых подстанций, сопряженное с потребностью в отводе земельных участков, а также прокладке подземных кабельных линий.

Одним из основных факторов, ограничивающих расстояние между тяговыми подстанциями, являются потери энергии в тяговых сетях. Наиболее значительно оно проявляется в условиях сравнительно малой интенсивности движения, при которых суммарный ток, потребляемый всеми транспортными средствами, находящимися на секции контактной сети, является относительно малым. В этих условиях реализация мероприятий,

направленных на стабилизацию уровня напряжения в контактной сети, позволила бы увеличить длину секций тяговой сети и соответственно расстояние между тяговыми подстанциями [1, 2].

В настоящее время становятся доступны эффективные устройства для накопления электрической энергии. К ним можно отнести конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС), а также литий-титанатные аккумуляторные батареи (ЛТА). На их основе становится возможным создание устройств, стабилизирующих уровень напряжения контактной сети [3]. При превышении напряжением в точке подключения к сети определенного значения такое устройство потребляет ток, заряжая накопитель. При понижении уровня напряжения вследствие потребления энергии транспортными средствами в режиме тяги накопитель переходит в режим разряда. Напряжение накопителя целесообразно выбирать близким к уровню 510 В, что равно минимально допустимому среднему уровню напряжения в тяговой сети по требованиям правил технической эксплуатации (уровень потерь 90 В относительно номинального напряжения холостого хода тяговой подстанции) [4].

Для определения эффективности предложенного решения необходимо установить мощность накопителя, место его установки и энергоемкость. Для этого был использован метод вероятностного эксперимента [1, 5]. Было рассмотрено большое количество возможных ситуаций, отличающихся между собой числом поездов на секции и потребляемых ими токами. В качестве исходных данных для расчета использовано распределение тяговых токов, потребляемых троллейбусом. Распределение было получено экспериментально при помощи бортового регистратора, установленного на троллейбус [6]. Для заданного набора поездных токов была определена величина падения напряжения в конце секции при равномерном распределении транспортных средств по ее длине.

Как показывают расчеты, применение накопителей энергии позволяет исключить просадку напряжения при больших кратковременных нагрузках и увеличить длину секций тяговой сети на 60 ... 100%, причем при низкой интенсивности движения эффективность применения накопителей энергии возрастает [4]. Требуемая мощность тяговых подстанций возрастает пропорционально длине секции.

Результаты моделирования представлены в табл. 1. Основным фактором, лимитирующим длину секции, является равенство средних мощностей заряда и разряда накопителя. Согласно результатам расчета, координату установки накопителя целесообразно принимать около 90% от длины секции.

Более точным методом определения эффекта от применения накопительных пунктов является применение имитационных моделей,

использующих метод расчета мгновенных схем замещения тяговой сети [2, 7]. Для его применения является необходимой реализация модели накопителя энергии в составе систем тягового энергоснабжения. В модели накопитель энергии является нелинейным элементом. Он имеет ограничение по принимаемому и отдаваемому току, степени заряда. Для учета этих особенностей применен метод последовательных приближений. При решении системы уравнений, описывающей мгновенную схему замещения, последовательно уточняется ток накопителя. В результате определяется фактическое напряжение контактной сети в точке подключения к ней накопительного пункта.

*Таблица 1. Расчет наибольшей допустимой длины секции тяговой сети*

Интервал движения, мин	Длина секции без НЭ, км	Длина секции с НЭ, км	Напряжение НЭ, В	Средняя мощность заряда и разряда, кВт	Наибольшая мощность разряда, кВт	Расстояние до накопителя энергии, км	Емкость накопителя энергии, МДж
2	1,8	2,9	512	20,4	350	2,65	2,45
3	2,1	3,5	512	18,9	238	3,2	2,27
5	2,4	4,6	512	15,8	218	4,1	1,90
10	3,1	6,5	512	13,6	210	5,7	1,63

Конструкция накопительного пункта должна предусматривать размещение самого накопителя и преобразователя напряжения. Для повышения КПД преобразователя диапазон колебаний напряжения конденсатора (в случае применения КДЭС) целесообразно выбирать близким к диапазону колебаний напряжения тяговой сети, например 350 ... 700 В. Согласно результатам моделирования, полная емкость накопителя с учетом неиспользуемого запаса энергии составит 0,6 ... 0,9 кВт·ч в зависимости от интенсивности движения. При удельной емкости конденсаторов двойного электрического слоя 4 Вт·ч/кг вес накопителя составит 150 ... 250 кг, а объем при плотности энергии 8 Вт·ч/л – 0,07 ... 0,12 м<sup>3</sup> [4]. Таким образом, размещение накопительного пункта не требует строительства специальных зданий.

Преобразователи накопительных установок по уровням напряжения и номинальной мощности весьма близки к тяговым преобразователям троллейбусов с коллекторными тяговыми двигателями и могут быть изготовлены на их основе. Необходимые доработки состоят в исключении

силовой цепи регулирования возбуждения и в изменении программы системы управления.

Стоимость накопительного пункта значительно ниже стоимости строительства новой тяговой подстанции, что подтверждает эффективность предлагаемого решения даже при относительно небольшом выигрыше по длине секций тяговой сети. Большое значение имеет применение накопительных постов в зимнее время, так как с вызванным работой отопительных приборов ростом мощности собственных нужд возрастают потери энергии в тяговых сетях [6]. Другим преимуществом предлагаемого решения является повышение надежности работы системы электроснабжения. Эффективность применения накопительных пунктов в системе электроснабжения трамвая будет ниже вследствие меньшего удельного сопротивления тяговой сети, а также высокой доли путей в капитальных затратах, связанных со строительством новых линий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-08-00656-а.

#### Список литературы

1. *Spiridonov, E.* Evaluation of energy recuperation efficiency for operating conditions of city electric transport / E. Spiridonov, M. Yaroslavtsev // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016.– Pt. 2.– P. 61-64.
2. *Ярославцев, М.В.* Определение электрических потерь в тяговой сети городского электротранспорта моделированием мгновенных схем замещения / М. В. Ярославцев // САПР и моделирование в современной электронике: сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции.– 2017.– С. 109-112.
3. *Штанг, А.А.* Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта / А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов, М. В. Ярославцев // Транспорт Российской Федерации.– 2012.– № 3-4 (40-41).– С. 68-70.
4. *Yaroslavtsev, M.V.* Increasing the Length of Trolleybus Contact Line Sections by Installation of Stationary Energy Storage Posts / M. V. Yaroslavtsev // The 19 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2018: proc., Eragol, Altai, 29 June – 3 July 2018.– IEEE Computer Society, 2018. – P. 473-476.
5. *Ярославцев, М.В.* Определение параметров энергоустановки гибридного автомобиля моделированием процесса потребления энергии / М. В. Ярославцев // Электротехника.– 2014.– № 12. – С. 17-21.
6. *Мятеж, А.В.* Исследование сезонных изменений потребления электрической энергии троллейбусом / А. В. Мятеж, М. В. Ярославцев, Д. Д. Забелина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.– 2014.– № 1-2.– С. 282-286.
7. *Кузнецов, С.М.* Исследование на математической модели переходных процессов в тяговой сети железных дорог постоянного тока при пуске поезда / С. М. Кузнецов, И. С. Демиденко, М. В. Ярославцев, А. В. Гашкова, А. О. Кривова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.– 2009.– № 2.– С. 324-327.

*Материал поступил в редколлегию 11.10.18.*