УДК 621.3

к.т.н. М. В. Ярославцев

(Новосибирск, НГТУ)

Определение электрических потерь   
в тяговой сети городского электротранспорта моделированием мгновенных схем замещения

Аннотация: Разработана математическая модель тяговой сети, позволяющая учитывать запирание тяговых подстанций, ограничение уровня напряжения при рекуперации и ограничение по мощности электроподвижного состава. Выполнен расчет средней мощности потерь в тяговой сети троллейбуса.

Annotation: The computational model of traction network accounting blocking of rectifiers at traction substations and voltage and power of vehicle limits during electric braking is realized. The average power losses in the traction network of trolleybus are calculated.

Ключевые слова: тяговая сеть, токораспределение, секция контактной сети, троллейбус, потребление энергии

Keywords: traction network, distribution of currents, electric traction, trolleybus, energy consumption

Для более полного использования имеющихся резервов экономии энергии на городском электрифицированном транспорте, в частности, изменения схем питания и секционирования тяговых сетей, передачи и использования энергии рекуперативных торможений и иных подобных решений необходимо разработка методов точного учета потерь передаваемой по тяговым сетям энергии. Решение этих проблем требует повышения точности применяемых методов расчета токов в тяговых сетях.

Представленные в литературе методы расчета распределения токов в тяговой сети и потребляемой поездами мощности используют ряд допущений и упрощений, обеспечивающих погрешность расчета до 10-20% [1]. Так, контактные сети обоих путей считаются соединенными параллельно, не учитывается сопротивление питающих линий, не учитываются особенности фактических режимов движения поездов, зависимость тока поезда от скорости его движения считается неизменной. Такие упрощения оказываются необходимыми для сокращения объема расчетов при выполнении их вручную либо при низкой степени автоматизации. Сложность расчета схем электроснабжения объясняется рядом причин, которые можно объединить в две основные группы:

1. Изменение количества поездов и взаимного расположения поездов относительно друг друга и подстанций, что, в свою очередь, изменяет топологию схем замещения и величины сопротивлений тяговой сети между машинами;

2. Наличие ряда нелинейностей в свойствах элементов схем замещения тяговых сетей: полупроводниковые приборы в выпрямительных агрегатах подстанций неспособны пропускать ток в обратном направлении; характеристики электроподвижного состава зависят от напряжения на его токоприемнике; импульсный тяговый привод, обладая возможностью осуществления следящего реостатно-рекуперативного торможения, способен перераспределять мощность торможения между тяговой сетью и тормозными реостатами.

Необходимым методом повышения точности энергетических расчетов является переход к решению систем уравнений, описывающих мгновенные схемы замещения тяговой сети, без упрощений, существенно понижающих точность. Решение проблемы может быть, таким образом, разделено на две части: формирование мгновенных схем замещения тяговой сети и расчет мгновенных схем замещения тяговой сети. Чтобы правильно определить такие параметры работы тяговой сети, как средняя отдаваемая ТП мощность, средний и эффективный токи фидеров, необходимо иметь достаточно большой набор исходных мгновенных схем замещения для различных режимов работы тяговой сети [2]. Мгновенные схем замещения должны представлять возможные режимы работы тяговой сети так, чтобы вероятность реализации *i*-го режима соответствовала доле моделирующих его мгновенных схем в исследуемом их массиве.

Для формирования мгновенных схем замещения применен метод вероятностного эксперимента. В этом методе случайные сечения графика движения моделируются путем выбора случайных точек из ранее полученных экспериментальным образом функций, задающих пары значений координата – потребляемая мощность. Для заданного числа поездов на секции такие пары значений равномерно выбираются случайным образом. Исходные зависимости мощности транспортных средств от координаты получены в ходе экспериментального исследования режимов движения троллейбуса [3, 4].

Промежуточным результатом является информация о координатах находящихся на секции тяговой сети поездов и потребляемой либо отдаваемой их тяговыми приводами мощности. Для режима торможения задается наибольшая мощность, которую поезд способен отдать при условии наличия потребителей вырабатываемой им энергии. Кроме того, перед началом расчета задается расположение тяговых подстанций и пунктов параллельного соединения, а также сопротивление контактной и рельсовой сетей.

Для расчета мгновенных схем замещения был предложен и реализован в вычислительной среде MATLAB алгоритм расчета мгновенной схемы замещения тяговой сети. Он состоит из следующих основных операций:

1. Загрузка параметров одной из мгновенных схем замещения тяговой сети.

2. Сортировка объектов на секции тяговой сети (поездов, подстанций, пунктов параллельного соединения) по координате.

3. Формирование системы уравнений, описывающих мгновенную схему замещения.

4. Решение системы уравнений методом последовательных приближений на основе метода узловых потенциалов. В ходе решения производится корректировка вектора токов последовательным увеличением мощности поездов. Точность решения определяется абсолютным значением разности узловых потенциалов, вычисленных в ходе текущей и предыдущей итераций.

5. Расчет токов тяговых подстанций и отдаваемых ими в тяговую сеть мощностей, а также определение потерь энергии в элементах тяговой сети.

После многократного повторения последовательности расчета для различных мгновенных схем тяговой сети могут быть определены средний и эффективный токи тяговых подстанций. Кроме того, может быть определен удельный расход энергии на тягу поездов.

Для проверки предложенной методики проведено сравнение средней мощности потерь, рассчитанных традиционным аналитическим методом и путем моделирования мгновенных схем замещения. Сравнение выполнено для различных режимов работы тяговой сети, характеризующихся различными значениями среднего и эффективного поездных токов (одностороннее и двухстороннее питание, летний и зимний режимы с использованием и без использования рекуперативного торможения). Расхождение полученных результатов не превышает 10%, что подтверждает корректность предложенной методики расчета.

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

Литература

1. *Шевченко В. В.* Электроснабжение наземного городского электрического транспорта. / В. В.Шевченко, Н. В. Арзамасцев, С. С. Бодрухина.– М.: Транспорт, 1987.– 271 с.

2. *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.

3. *Ярославцев М. В.* Определение параметров энергоустановки гибридного автомобиля моделированием процесса потребления энергии / М. В. Ярославцев // Электротехника.– 2014.– № 12. – С. 17-21.

4. *Ярославцев М. В.* Выбор основных параметров тягового привода гибридного транспортного средства / М. В. Ярославцев // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014) = Electrical engineering. Energy. Mechanical engineering (EEM–2014) : сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 290-293.