

Д. А. БОСЫЙ, канд. техн. наук, доц., докторант ДНУЖТ, Днепропетровск

### УЧЕТ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Введение.** Эффективность функционирования электроэнергетических систем принято оценивать уровнем технологических потерь, которые, безусловно, возникают при передаче электрической энергии к потребителю. Системы тягового электроснабжения не являются исключением, но из-за специфических особенностей их устройства достаточно сложно создать коммерчески точную систему учета потерь. Либерализация рыночных отношений в электроэнергетике и реформирование отрасли железнодорожного транспорта, кроме того, заостряют нерешенную проблему взаимодействия различных хозяйств – локомотивного и электрификации в части разделения потерь электрической энергии. До настоящего времени на железных дорогах Украины разницу электроэнергии, отпущенной тяговыми подстанциями и потребленной электроподвижным составом, определяют неавтоматизированным способом, существенную погрешность в которых вызывает ряд объективных и человеческих факторов.

**Анализ последних достижений и литературы.** Практически с начала массовой электрификации ученым и специалистам стало понятно, что точное измерение потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения невозможно через стохастический характер нагрузки [1-2]. Определенное разрешение в проблеме позволяли выполнить не прямые способы определения потерь, основанные на аппаратном интегрировании квадрата кривой токов фидеров тяговых подстанций, т.н. метод «ампер-квадрат-часов» [3-4]. Этот метод, по сути, был позаимствован из стационарной энергетики, которым достаточно удобно определять потери для объектов с постоянными характеристиками, такими как трансформаторы, преобразователи, воздушные или кабельные линии. При адаптации метода к системам тягового электроснабжения, в ряде работ исследованы зависимости коэффициента для настройки счетчиков потерь в зависимости от целого ряда факторов – уравнивающих токов, количества нагрузок на межподстанционной зоне, схемы питания и т.п. Указанные факторы составляли погрешность метода на уровне 7,5 %. Дальнейшие исследования были направлены на выявлении этих закономерностей и оперативное изменение настройки счетчиков потерь в процессе эксплуатации. Так, в работе [5], получены эмпирические зависимости в виде уравнений нелинейной регрессии на примере участков постоянного и переменного тока. Учет факторов в совокупности по данным работы позволил добиться повышения точности учета потерь на 6,9 % по отношению к расчетам по действующей методике. К недостаткам следует отнести человеческий фактор, который все же присутствует при настройке счетчиков и выборе регламентов изменения этих параметров настройки.

Существуют так же разработки коммерческих способов учета электроэнергии, потребляемой непосредственно электроподвижным составом. Актуальность данных попыток обусловлена тем, что существующую систему учета электроэнергии при действующих условиях невозможно считать коммерческой. Объективными причинами являются – низкий класс точности измерительных приборов, подключение приборов учета к силовой обмотке трансформатора для большинства электровозов переменного тока, низкая чувствительность при шунтовой схеме подключения, недостатки работы системы учета при рекуперации электроэнергии на постоянном токе. Кроме того, и в электровозах постоянного и переменного тока не исключается человеческий фактор воздействия на точность работы системы учета. Ввиду того, что при выполнении поездок по технологическим причинам необходимо полностью отключать силовые цепи существует вероятность вмешательства в цепи учета с целью «экономить» расход электроэнергии на тягу. Кроме того, при ручном съеме показаний учета возможны случаи некорректного соотношения расхода на разные участки обслуживания, с той же целью вписаться в установленные нормы расхода электроэнергии.

**Постановка проблемы.** Проведенный анализ показывает, что есть необходимость в создании автоматизированной системы учета потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения, которая полностью исключит человеческий фактор и позволит соотносить затраченную электроэнергию между расходами на перевозку и обслуживание перевозочного процесса.

**Проведение исследований.** Для проведения исследований создана математическая модель измерительной системы потерь в зависимости от расстояния между установкой измерительных устройств. Модель представляет собой дополнение к пространственно-временному представлению процессов в системах тягового электроснабжения. Дополнение заключается в том, что для каждого момента времени, с шагом, равным интервалу расстановки приборов (рис. 1), определяется кривая распределения напряжения в контактной сети для заданной в этот момент времени расположения нагрузки. На основании того, что известны расстояния между приборами и известно удельное сопротивление контактной сети, определяется ориентировочное значение токов на каждом из участков, получаемых между приборами. Векторное произведение получаемых таким образом функций распределения потерь напряжения и токов в контактной сети определит значение потерь с погрешностью. Погрешность в данном случае будет обусловлена в периоды времени нахождения движущейся нагрузки между точками измерения напряжения. В конечном итоге точность предложенного способа будет зависеть от частоты расположения таких датчиков на участке.

© Д.А. Босый, 2015

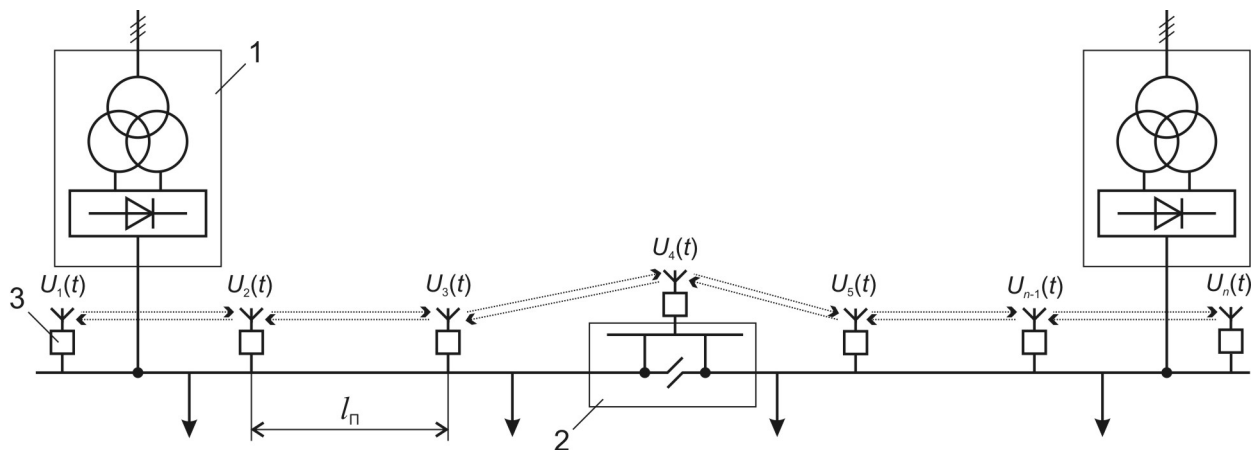


Рис. 1. Схема расположения измерительных устройств с беспроводной передачей данных:  
1 – тяговая подстанция; 2 – пост секционирования; 3 – измерительные устройства

С целью удешевления возможно в данном случае использование новой технологии беспроводной передачи данных с возможностью построения ячеистой топологии сети ZigBee стандарта IEEE 802.15.4. Известны и доступны на рынке аппаратные реализации данной технологии в виде модулей и устройств с гарантированной дальностью передачи до 3 км в условиях прямой видимости, которые вполне пригодны для реализации описанной системы измерения в условиях действующих участков железной дороги.

Для расчета погрешностей измерения, вызванной моментами времени расположения нагрузки между контрольными точками, использованы характеристики поездов с сопоставимыми весами, на одном и том же участке с привязкой к координате. Вопреки распространенному мнению, что реализации тяговой нагрузки являются случайными функциями и требуют специальных методов расчета, анализ токовых нагрузок с привязкой к координате пути показывает наличие явно выраженных детерминированных составляющих, удельная часть которых составляет не менее 90 %. Различия в приведенных характеристиках определяются техническими особенностями ведения поезда, действующими ограничениями скорости на участке, техническими возможностями применения рекуперативного торможения.

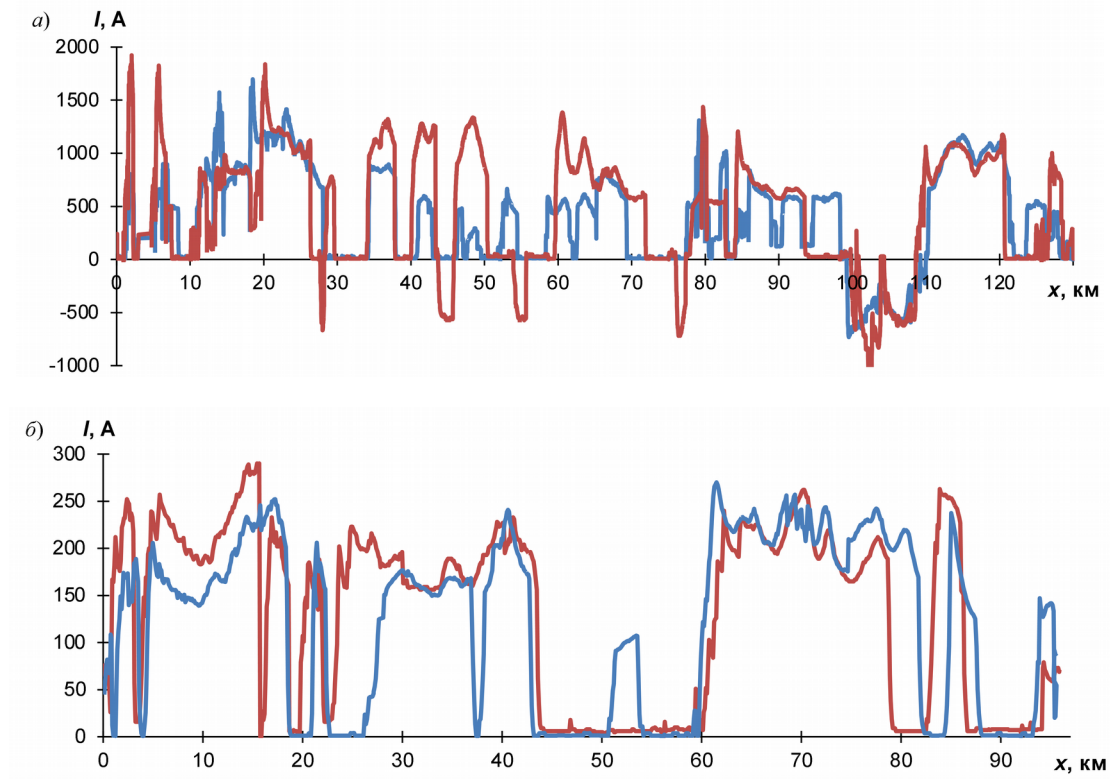


Рис. 2. Токовые характеристики поездов на участке постоянного (а) и переменного (б) тока

На основании результатов измерения параметров электроснабжения тягово-энергетической лабораторией, выполнены расчеты удельного электропотребления на приграничных участках двух железных дорог в связи с проблемой соотношения расходов на тягу поездов. При этом, использованы зафиксированные величины потребления электроэнергии с привязкой к координате пройденного пути для 7-ми поездов в четном и нечетном направлении.

Используя полученные результаты, определено потребление электроэнергии, которое приходится на каждый перегон между станциями граничащих дорог. Определены также и удельные показатели расхода электроэнергии на единицу перевозочной работы ( $10^4$  ткмбр) с последующим приведением относительно длин выбранных участков. Используя полученное таким образом распределение частей электроэнергии при известной схеме питания можно определить соотношение потребленной энергии на тягу между разными дорогами. Для этого за 100 % принимается суммарная потребленная электроэнергия, а результат получается в виде суммы соответствующих частей для каждой дороги до их границы.

Такие расчеты были выполнены для Одесской и Южной железных дорог Украины при нормальной схеме питания. Результирующее распределение частей приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношение частей потребления электроэнергии

№ поезда	Вес, т	Части электроэнергии, %	
		Южная ж.д.	Одесская ж.д.
2973	6012	70,38	29,62
2967	4895	74,88	25,12
2968	1383	74,92	25,08
2969	4819	69,15	30,85
2973	5960	68,43	31,57
2971/2	1380	72,72	27,28
в среднем		71,75	28,25

Из данных таблицы видно, что распределение удельных частей электроэнергии между железными дорогами представляет собой устойчивую величину, которое с определенной ошибкой может использоваться для соотношения между соседними железными дорогами.

**Анализ результатов.** На рис. 3 приведены полученные характеристики погрешности предложенной системы учета потерь в зависимости от расстояния между установкой измерительных устройств. Зависимость имеет сложный характер, в общем случае с уменьшением количества приборов на длине участка погрешность возрастает. Максимальное значение может достигать 21 % (рис. 3, а). В более узком диапазоне расположения приборов (рис. 3, б) интервалы изменения погрешностей составляют 1 – 3 %.

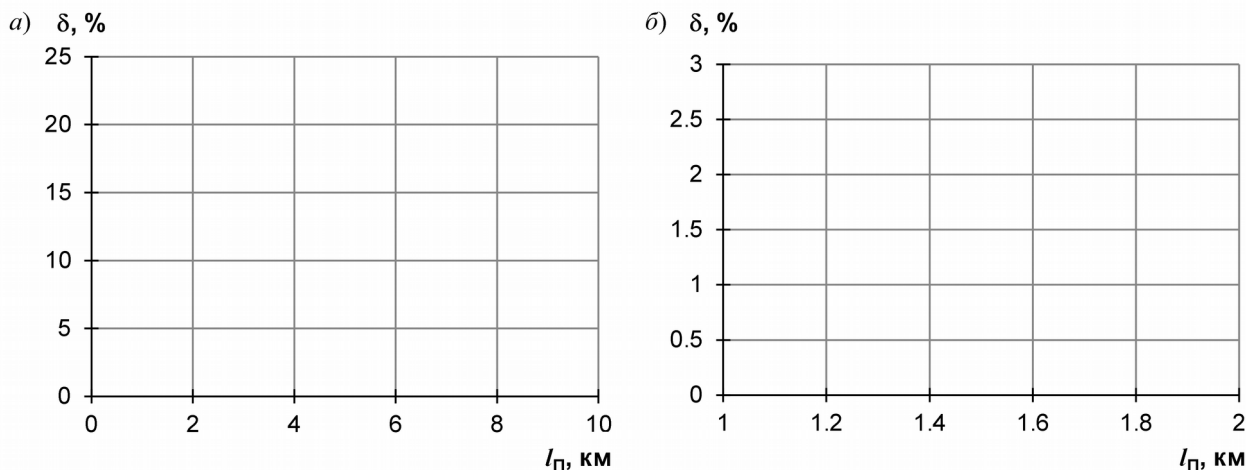


Рис. 3. Зависимости погрешности измерения потерь электроэнергии в контактной сети от расстояния между измерительными приборами

Проведенный анализ результатов показал, что для предложенной системы измерения потерь в контактной сети не может быть достигнут коммерческий класс точности 0,2 – 0,5 %. Тем не менее, при интервалах расположения от 1,0 до 2,0 возможно существенное снижение погрешности существующих не прямых способов определения потерь до 1,0 – 2,5 %, что может быть приемлемо в качестве системы аппаратного технического учета. Причиной возникновения погрешности при прочих равных условиях являются расхождения в приближенных и реальных распределениях тока и падения напряжения в контактной сети (рис. 4), которые в интегральном исчислении на периоде исследования составляют указанные погрешности.

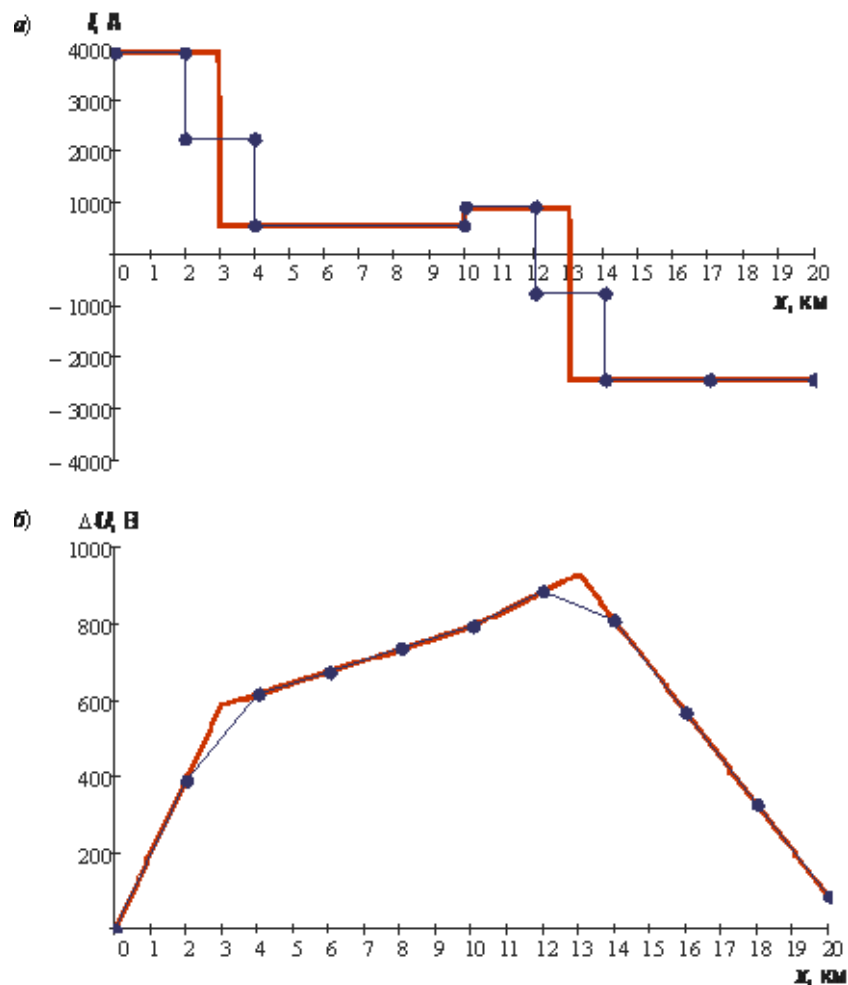


Рис. 4. Расхождения между реальным распределением (толстая линия) и приближенным распределением (тонкая линия с точками): а – ток в контактной сети; б – падение напряжения в контактной сети

**Выводы.** Уровень технологических потерь, которые возникают при передаче электрической энергии к потребителю, определяет эффективность функционирования электроэнергетических систем.

Для систем тягового электроснабжения необходима автоматизированная система учета потерь электроэнергии, которая полностью исключит человеческий фактор и позволит соотнести затраченную электроэнергию между расходами на перевозки и обслуживание перевозочного процесса.

Предложенная система, которая состоит из расположенных на участке железной дороги измерительных устройств с беспроводным обменом данными, позволяет достичь точности в 1,0 – 2,5 % при размещении приборов от 1 до 2 км.

**Список литературы:** 1. Кузнецов В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мьцко, Д. А. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2006. – Вип. 12. – С. 36-40. 2. Власьевский С. В. Влияние различных факторов на потери электрической энергии в тяговой сети при работе электровозов переменного тока / С. В. Власьевский, О. А. Клинова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2007. – Вип. 14. – С. 30-34. 3. Кузнецов В. Г. Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямим способом / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2012. – Вип. 42. – С. 103-109. 4. Босий Д. О. Удосконалення непрямого методу обліку втрат електричної енергії в контактній мережі / Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 35-39. 5. Кирилюк Т. І. Удосконалення методу контролю втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць: авт. дис. к. т. н. / Т. І. Кирилюк. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – 22 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kuznetsov V. G., Mytsko R. S., Bosiy D. A. *Otsenka poter elektroenergii v tyagovoy seti magistral'nykh zheleznykh dorog*. Bulletin of the Dnipropetvsk National University of Railway Transport, 2006, No. 12, pp. 36-40. 2. Vlas'evskiy S. V., Klinkova O. A. *Vliyanie razlichnykh faktorov na poteri elektricheskoy energii v tyagovoy seti pri rabote elektrovovov peremennogo toka*. Bulletin of the Dnipropetvsk National University of Railway Transport, 2007, No. 14, pp. 30-34. 3. Kuznetsov V. G., Bosiy D. O., Kirilyuk T. I. *Oblik vtrat elektrichnoy energii v tyagoviy merezhi nepryamim sposobom*. Bulletin of the Dnipropetvsk National University of Railway Transport, 2012, No. 42, pp. 103-109. 4. Bosiy D. O., Kirilyuk T. I. *Udoskonalennya nepryamogo metodu obliku vtrat elektrichnoy energii v kontaktniy merezhi*. East European Journal of advanced technologies, 2012, No. 5/8 (59), pp. 35-39. 5. Kirilyuk T. I. *Udoskonalennya metodu kontrolyu vtrat elektroenergii v kontaktniy merezhi elektrifikovanih zaliznits'*. Dnipropetrovsk: DNURT Publ., 2013, 22 p.

Поступила (received) 28.08.2015