

исследование дозвукового пограничного слоя на пластине со сдувом / В.П. Мугалев // ИВУЗ Авиационная техника. – 1959. – № 3. – С. 33-40 **12**. Терещенко Ю.М. О газодинамическом воздействии на структуру потока за элементами статора осевого компрессора ГТД / Ю.М. Терещенко // Журнал «Известия ВУЗ» Авиационная техника. – 1981. – №3. – С.14-17 **13**. Терещенко Ю.М. Аэродинамические характеристики диффузорных решеток с управлением циркуляцией / Ю.М. Терещенко // ИВУЗ Авиационная техника. – 1976. – № 4. – С.22-24

Поступила в редколлегию 15.05.2012.

УДК 621.006.354

В.Г. КУЗНЕЦОВ, доц., канд.техн.наук, ДНУ, Днепропетровск,
Б.А. КОСТЮКОВСКИЙ, канд.техн.наук, нач.отд., Институт общей
энергетики НАН Украины, Киев

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В даній статті запропоновано методологічні підходи до визначення потенціалу енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму, запропонована його класифікація, визначені складові частини.

Ключові слова: енергозбереження, система тягового електропостачання, втрати електроенергії, контактна мережа, тягова підстанція.

В данной статье предложены методологические подходы к определению потенциала энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока, предложена его классификация, определены составные части.

Ключевые слова: энергосбережение, система тягового электроснабжения, потери электроэнергии, контактная сеть, тяговая подстанция.

In this paper the authors proposed a methodological approach to the definition of energy saving potential in DC traction power supply systems, offered its classification, defined its parts.

Keywords: energy saving, traction power supply system, energy losses, contact line, traction substation.

Управление развитием и функционированием железнодорожного транспорта Украины в условиях постоянно растущих цен на топливно-энергетические ресурсы требует особого внимания к решению проблемы повышения эффективности использования энергоресурсов и к реализации энергосберегающей политики в отрасли, что обуславливает актуальность научных исследований направленных на её решение.

Первым этапом решения этой проблемы является определение технического потенциала энергосбережения, который может определяться как для отдельного i -го энергосберегающего мероприятия на k , $k \in K$, элементе (объекте) рассматриваемой производственно-хозяйственной системы, так и для различных множеств таких мероприятий, $i, i \in I$.

Это потенциал может рассчитываться как в абсолютном выражении (1), так и в относительных единицах (2).

$$PES_{KI}^A = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (K_j \cdot (W_{ki}^B - W_{ki}^P) \cdot T_{ki}) \quad (1)$$

$$PES_{KI}^o = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (\sum_{j \in J} (K_j \cdot (W_{ki}^B - W_{ki}^P)) \cdot T_{ki})}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} K_j \cdot W_{ki}^B \cdot T_{ki}} \quad (2)$$

где PES_{KI}^A, PES_{KI}^o - абсолютный и относительный потенциал энергосбережения;

W_{ki}^B, W_{ki}^P - потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) до и после реализации энергосберегающего мероприятия в условных единицах измерения если рассматривается экономия более одного вида ТЭР. Если рассматривается только один вид ТЭР, то в этом случае потенциал может рассчитываться в натуральных единицах;

j - индекс вида ТЭР, $j \in J$;

K_j – коэффициент перевода натуральных единиц измерения в условные;

T_{ki} - период времени, для которого рассчитывается снижение затрат ТЭР, для соответствующего энергосберегающего мероприятия.

При использовании выражений (1) и (2) для k элемента системы может рассматриваться только одно энергосберегающее мероприятие из каждого альтернативного множества

На практике наибольшее значение имеет определение экономически целесообразного потенциала энергосбережения и формирование, на этой основе, планов его реализации. Граничным условием экономической целесообразности реализации энергосберегающего мероприятия является как минимум равенства дополнительных затрат – инвестиционных, эксплуатационных и т.д., за жизненный цикл связанных с реализацией такого мероприятия Z_{ki} и суммарной стоимости сэкономленных энергоресурсов за жизненный цикл его реализации, что формализуется в таком виде:

$$PES_{KI}^E = \sum_{t=1}^T (Z_{ki} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{jt} \cdot \Delta O_{kijt}) \geq 0 \quad (3)$$

где PES_{KI}^E - экономически-целесообразный потенциал энергосбережения;

t - расчетный этап в период жизненного цикла;

j - индекс вида ТЭР;

C_{jt} - стоимость соответствующего вида ТЭР;

ΔO_{kijt} - объём сэкономленных ТЭР.

Необходимо отметить, что технологический и экономически целесообразный потенциал может изменяться, с течением времени, под влиянием научно-технического прогресса и экономической конъюнктуры. Однако эти изменения под влиянием этих факторов, как правило, происходят на протяжении достаточно длительного периода.

В зависимости от специфики решаемой задачи, показатель потенциала энергосбережения идентифицируется набором классификационных признаков, причем некоторые из них прямо зависят от особенностей исследуемой системы. Для идентификации потенциала энергосбережения систем электроснабжения железной дороги, предлагается использовать набор квалификационных признаков, который представлен в табл.а .

В общем виде процесс оценки потенциала энергосбережения для железнодорожного транспорта включает следующие этапы:

- а) формулирование целей оценки потенциала энергосбережения;
- б) определение перечня объектов и соответствующих энергосберегающих мероприятий (множества K и I);
- в) разработка алгоритмов оценки потенциала энергосбережения, который бы отражал специфику объекта и энергосберегающего мероприятия;
- г) сбор информации необходимой информации для реализации соответствующих алгоритмов;
- д) расчёт потенциала энергосбережения.

При решении практических задач по определению приоритетов реализации потенциала энергосбережения и формирования соответствующих планов, необходимо учитывать наличие ограничений, прежде всего инвестиционных. Это обуславливает то, что не всегда возможной оказывается реализация мероприятий с наибольшим технически достижимым потенциалом энергосбережения.

Поэтому, для решения таких задач необходимо применение оптимизационных моделей, которые в упрощенной постановке формализуются в следующем виде:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} \cdot PES_{kin}^E \rightarrow \max \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} Z_{ki} \leq Z^{sum} \quad (6)$$

где:

n - индекс множества альтернативных энергосберегающих мероприятий;

b_{kin} - булева переменная;

Z^{sum} - общий объём средств на реализацию энергосберегающих мероприятий.

При освоении потенциала энергосбережения, в первую очередь целесообразно реализовывать организационно-технологических энергосберегающие мероприятия, которые не требуют значительных затрат на их реализацию.

Одним из таких мероприятий является реализация технически доступного потенциала снижения потерь для систем электроснабжения тяги поездов на постоянном токе за счёт согласованной оптимизации графика движения поездов и их схем электропитания.

Особенностью этого потенциала является то, что он зависит от уровня потерь при фактическом состоянии схемы электропитания и при оптимальной схеме:

$$PES_{ki}^E = F(ki, N^{opt}) - F(ki, N^{fakt}) \quad (7)$$

где ki - коэффициент интенсивности движения поездов, определяющий загрузку оборудования подстанций, неуравновешенность нагрузки по колеям пути и т.д.;

N^{opt}, N^{fakt} - соответствует оптимальной и фактической схеме электропитания.

Таким образом, этот потенциал может существенно изменяться с течением временем - является динамическим, что обусловлено его спецификой. Наряду с этим, специфическим для централизованных систем электроснабжения является наличие системного эффекта от снижения потерь на низших классах напряжения, т.к. это вызывает дополнительное снижение потерь на более высоких классах напряжения - в питающих линиях электропередач и трансформаторах [1]. Величина этого, дополнительного эффекта, будет определяться характеристиками элементов входящих в систему электроснабжения, а также всеми имеющиеся между ними связями (основные элементы системы электроснабжения потребителей электротранспорта и соответствующие потенциалы энергосбережения представлены на рис. 1). При этом потенциал энергосбережения системы электроснабжения представляет собой совокупность потенциалов энергосбережения входящих в него элементов и может быть рассчитан как сумма значений потенциалов отдельных элементов.

Так, электрический потенциал энергосбережения дистанции электроснабжения (ЭЧ), может быть определён по следующему выражению.

$$P_{эл}^{ЭЧ} = \sum_{i=1}^{n_1} P_{ЭЧci} + \sum_{j=1}^{n_2} P_{СЦБj} + \sum_{l=1}^{n_3} P_{Кcl} + \sum_{i=1}^{n_4} P_{ТПk} + P_{вн}, \quad (8)$$

где $P_{эл}^{ЭЧ}$ - электрический потенциал энергосбережения ЭЧ;

$P_{вн}$ - потенциал энергосбережения во внешней системе электроснабжения (системный эффект), обусловленный снижением потребности в электроэнергии в потребителей железной дороги;

$P_{ЭЧci}$ - электрический потенциал энергосбережения i -того района электрических сетей (ЭЧС);

$P_{СЦБj}$ - электрический потенциал энергосбережения j -того участка сетей электроснабжения СЦБ (сигнализация, централизация и блокировка);

$P_{Кcl}$ - электрический потенциал энергосбережения l -того участка контактной сети (КС);

$P_{ТПi}$ - электрический потенциал энергосбережения k - той тяговой подстанции (ТП);

n_1, n_2, n_3, n_4 - количество районов ЭЧС, участков питания устройств СЦБ, участков контактной сети и тяговых подстанций соответственно, которые структурно входят в рассматриваемую дистанцию электроснабжения.

Определение $P_{вн}$ базируется на использовании коэффициента потерь во внешней системе электроснабжения и его определения производится в рамках двух этапной процедуры.

На первом этапе определяется потенциал энергосбережения только от мероприятий на железной дороге - $P_{жд}$, который определяется из модифицированного выражения (8) в котором отсутствует последнее слагаемое.

На втором этапе определяется $P_{вн}$ из выражения:

$$P_{вн} = K_{вн} \cdot P_{жд} \quad (7)$$

где $K_{вн}$ – усреднённый коэффициент потерь в питающих линиях и трансформаторах системы внешнего электроснабжения.

Таблица 1. Классификационные признаки потенциала энергосбережения на железнодорожном транспорте

| | | | | | |
|--|---|----------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| Квалификационный признак | | | | | |
| Элементы (объекты) исследуемой системы | Система электроснабжения тяги поездов в целом | Дистанции электроснабжения | Цехи, участки, тяговые подстанции, районы контактной сети | Технологические процессы | Установки, оборудование машины и т.д. |
| Вид потенциала энергосбережения | Теоретический | Технически достижимый | | Экономически целесообразный | |
| Тип энергосберегающего мероприятия | Организационно-технологический | | Инвестиционный | | |
| Вид ТЭР | ТЭР в целом | Группа ТЭР | Конкретный вид ТЭР | | |
| Единицы измерения | Натуральные | Условные | Стоимостные | Относительные | |
| Временной интервал расчета | Жизненный цикл энергосберегающего мероприятия | | Определенный период жизненного цикла (год, месяц и т.д.) | | |
| Уровень реализации | Прогнозный | Плановый | | Фактический | |

Усредненные значения уровня потерь электроэнергии в контактной сети можно определить на основе экспериментально-аналитического подхода. Для этого используются значения экспериментально определенных потерь электроэнергии и расходов на отдельных участках железной дороги при организации опытных поездок с фиксацией расходов электроэнергии по счётчикам локомотивов и по счётчикам тяговых подстанций, а также аналитических расчетов с использованием выражений приведенных в [2] для различных схем питания и разной интенсивности движения.

Величина электрического потенциала энергосбережения в

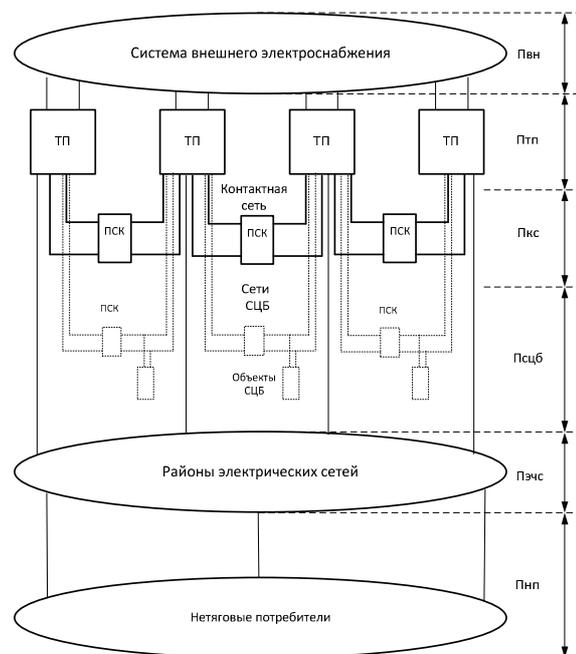


Рис.1. Основные элементы системы электроснабжения потребителей электротранспорта и соответствующие потенциалы энергосбережения

контактной сети от уменьшения уравнивающих токов зависит от множества случайных факторов. В [3] экспериментальным путём был установлен эффект от регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций путём изменения коэффициентов трансформации силовых трансформаторов. На электрифицированном участке Удачная-Желанная Донецкой ж.д. удалось снизить потребление электроэнергии на 474 тыс. кВт.ч при общем потреблении электроэнергии на участке 10,889 млн. кВт.ч (это соответствует уменьшению потребления электроэнергии на 4,35%). Безусловно, при осуществлении данного регулирования не удалось полностью устранить уравнивающие токи. Многовариантные расчёты на моделях показали, что за счёт этого метода можно сократить потери электроэнергии на 4-5%. Теоретически с помощью регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций можно полностью избавиться от потерь электроэнергии, вызванных уравнивающими токами. Поэтому в данном случае потенциал энергосбережения равен потерям в контактной сети от протекания уравнивающих токов.

На тяговых подстанциях постоянного тока можно переключать на параллельную работу понизительные и преобразовательные трансформаторы в зависимости от интенсивности движения [4]. Потенциал энергосбережения в тяговых подстанциях за счёт этих мероприятий зависит от коэффициента загрузки. Очевидно, что он будет равняться сумме потенциалов энергосбережения в понизительном и преобразовательном трансформаторах (если на тяговой подстанции применяется двойная трансформация). Для определения его величины необходимо вычесть потери электроэнергии при однострансформаторном режиме из потерь электроэнергии при двухтрансформаторном режиме (при соответствующем коэффициенте загрузки). Запишем выражение для электрического потенциала энергосбережения в трансформаторах тяговой подстанции постоянного тока с двойной трансформацией

$$\Pi_{\text{тп}} = \Pi_{\text{тппт}} + \Pi_{\text{тптт}}, \quad (9)$$

где $\Pi_{\text{тппт}}$ - электрический потенциал энергосбережения в понизительных трансформаторах;

$\Pi_{\text{тптт}}$ - электрический потенциал энергосбережения в тяговых трансформаторах.

$$\Pi_{\text{тр}} = \frac{\Delta W_1(k_3) - \Delta W_2(k_3)}{\Delta W_1(k_3)}, \quad (10)$$

где $\Pi_{\text{тр}}$ - электрический потенциал энергосбережения в трансформаторах (понизительных или тяговых);

$\Delta W_2(k_3)$ - потери электроэнергии в трансформаторах при двухтрансформаторном режиме при соответствующем коэффициенте загрузки;

$\Delta W_1(k_3)$ - потери электроэнергии в трансформаторах при однострансформаторном режиме при соответствующем коэффициенте загрузки;

В качестве примера определим электрический потенциал энергосбережения для тяговой подстанции, на которой применяется двойная трансформация. На

данной подстанции установлены понизительный трансформатор ТДН-10000/110/11 $P_{xx}=18$ кВт, $P_{кз}=60$ кВт и преобразовательный трансформатор ТДП-12500/10ЖУ1 с параметрами $P_{xx}=16$ кВт, $P_{кз}=72,5$ кВт. Расчётный промежуток времени принимаем $T=24$ ч. Расчёты выполним в соответствии с [2]. На рис. 2 и рис. 3 показаны графики изменения электрического потенциала энергосбережения в преобразовательных и понизительных трансформаторах, рассчитанные по (Ошибка! Источник ссылки не найден.).

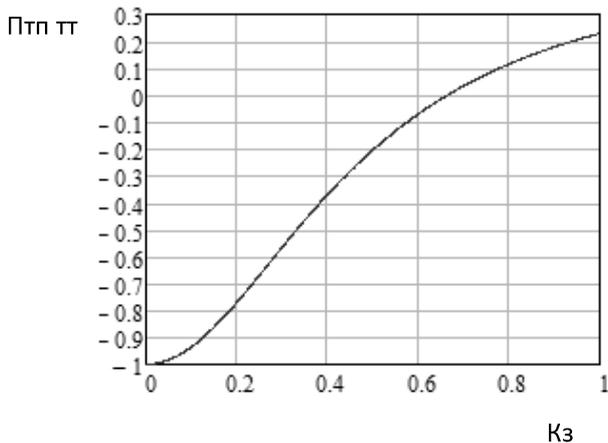


Рис.2. График зависимости электрического потенциала энергосбережения в преобразовательных трансформаторах ТДП-12500/10ЖУ1 от коэффициента загрузки

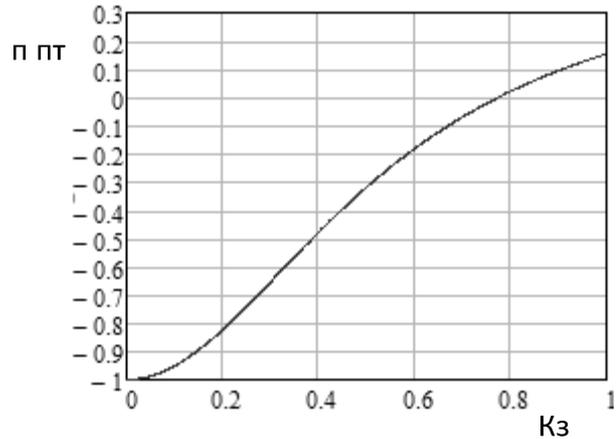


Рис.3. График зависимости электрического потенциала энергосбережения в понизительных трансформаторах ТДН-10000/110/11 от коэффициента загрузки

Следует отметить, что отрицательные значения потенциала энергосбережения говорят о нецелесообразности применения двухтрансформаторного режима при низких значениях ki . Очевидно, что наибольшую эффективность переход на параллельную работу будет иметь при максимально возможных коэффициентах загрузки трансформаторов. Для данного примера суммарный технический потенциал энергосбережения в трансформаторах составил 38,3% при условии, что при максимальных значениях ki использовалась однотрансформаторная схема. Умножение этого числа на величину средних потерь в оборудовании тяговых подстанций позволяет определить потенциал энергосбережения от такого мероприятия.

Потенциал экономии электроэнергии за счёт применения рациональной схемы питания при высоких значениях ki приведено в табл.2 (при его низких значениях получаем, по сути, зеркальное отражение представленной в табл. 2 ситуации).

Учитывая динамический характер потенциала энергосбережения за счет реализации мероприятий по согласованной оптимизации графика движения поездов и схем электроснабжения, технически достижимый потенциал по минимальной оценке составляет 4 - 5% от общего объёма электропотребления. Это примерно соответствует 100 млн. кВт. ч. в год., что в стоимостном выражении составляет около 50 млн. грн. в год.

Таблица 2. Структура потенциала энергосбережения в элементах системы электроснабжения за счет оптимизации ее схемы

| Наименование элемента системы электроснабжения | | Величина среднего процента потерь активной энергии, % | Потенциал экономии электроэнергии, % |
|---|------------------------------|---|--------------------------------------|
| Тяговая подстанция при двухтрансформаторной схеме питания | | 8...10 | 1,5...4 |
| Контактная сеть | Параллельная | 2 - 3 | 7 – 9* |
| | Узловая | 3 – 4 | 6 – 8* |
| | Двухсторонняя | 5.5 - 6.5 | 3.5 – 5.5 |
| | Консольная схема | 10 - 11 | – |
| | Потери от уравнивающих токов | 4...5 | 4 - 5 |

* - относительно одностранформаторной схемы

** - относительно консольной схемы

Реализация этого потенциала требует создания специальных алгоритмов и методов согласованной оптимизации интенсивности движения поездов и схем электропитания и реализации соответствующих организационно-технологических мероприятий на железнодорожном транспорте.

Вывод

В данной статье предложен общий подход по определению потенциала энергосбережения на железнодорожном транспорте. Предложенный подход к описанию потенциала энергосбережения позволяет:

- Формализовать потенциал энергосбережения на железнодорожном транспорте;
- Дать качественную и количественную характеристику каждому из видов потенциала энергосбережения;
- Разработать алгоритмы определения потенциала энергосбережения.

Выполнена, с использованием предложенного подхода оценка потенциала энергосбережения для специфического энергосберегающего мероприятия - согласованной оптимизации графика движения поездов и схем электроснабжения на постоянном токе, реализация которого позволяет обеспечить ежегодную экономию электроэнергии на уровне не менее 100 млн. кВт. час в год.

Список литературы: 1. Оцінка обсягів скорочення викидів парникових газів за рахунок зниження технологічних витрат в розподільчих мережах України [Текст]: звіт з НДР / кер. *Б.А. Костюковський*. -К.: Інститут загальної енергетики, 2011.-11с. 2. Інструкція розрахунку технологічних витрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання. ЦЕ-0007 : затверд. Наказом Укрзалізниці від 29.08.2003р. №342-ЦЗ. [Текст] / Розроб. *В.Т. Доманський, Р.С. Мицко*. -К.: Мін-во трансп. України. Держ. адмін. заліз. трансп. України. Укрзалізниця, 2003.-53с. 3. *Бітюков, С.Д.* Оптимізація споживання електроенергії на електричному транспорті з використанням інформації автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії [Текст] / *С.Д. Бітюков, В.Г. Кузнецов, В.Г. Сиченко* // Проблеми загальної енергетики.-2011.-№3(26).-С.39-44. 4. *Кузнецов, В.Г.* Задача определения условий рационального распределения мощности тяговой подстанции постоянного тока [Текст] / Восточно-Европейский журнал передовых технологий.-2011.-№2/8 (50).-С.26-31.

Поступила в редколлегию 11.05.2012