

У даній статті представлена графова модель системи енергозберігаючих заходів для господарства електрифікації та електропостачання залізничного транспорту. Підкреслюється, що вибір енергозберігаючих заходів необхідно проводити за кількома критеріями у відповідності з ієрархією цілей. За допомогою представленого графа можна визначити ефективність заходів у відповідності з ієрархією цілей

Ключові слова: графова модель, залізниця, система тягового електропостачання, тягова підстанція, контактна мережа

В даній статті представлена графова модель системи енергозберігаючих заходів для господарства електрифікації та електропостачання залізничного транспорту. Підкреслюється, що вибір енергозберігаючих заходів необхідно проводити за кількома критеріями у відповідності з ієрархією цілей. За допомогою представленого графа можна визначити ефективність заходів у відповідності з ієрархією цілей

Ключевые слова: графова модель, железная дорога, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, контактная сеть

ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

В. Г. Кузнецов

Доктор технических наук, доцент
Кафедра "Электроснабжение
железных дорог"

Днепропетровский национальный
университет железнодорожного транспорта
им. ак. В.А. Лазаряна

ул. ак. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск,
Украина, 49010

E-mail: vkuz@i.ua

1. Введение

Хозяйство электрификации и электроснабжения железных дорог можно рассматривать как совокупность различных технологических процессов, объединенных решением задачи бесперебойного снабжения электроподвижного состава электроэнергией соответствующего качества. При этом должно быть экономичное расходование электроэнергии и рациональный уровень потерь, возникающих в процессе передачи и преобразования. Как любая сложная система данная система управления устройствами электроснабжения имеет иерархическую структуру, состоящую из отдельных подсистем, имеющих самостоятельные цели управления и общую для всей системы цель.

2. Анализ основных исследований и публикаций

Вопросы увеличения энергетической эффективности систем электроснабжения и в частности систем тягового электроснабжения, определения рациональных режимов, всегда были в поле зрения учёных. Так концепция оптимальной системы электроснабжения приведена в [1], в [2] приведены общие подходы к оптимизации систем тягового электроснабжения. Вопросам повышения энергетической эффективности электроснабжения тяги посвящены работы [3-6]. Созданию информационных энергооптимальных технологий посвящены работы [7]. Вопросы функционирования систем электроснабжения при закупке электроэнергии по оптовым ценам освещены в [8-15]. В [16] показано, что проблема энергосбережения в системах тягового

электроснабжения является комплексной, многоуровневой и многофакторной.

Целью данной статьи является разработка графовой модели для выбора мероприятий по энергосбережению в хозяйстве электрификации и электроснабжения электротранспорта.

3. Изложение основного материала

Для реализации комплексного подхода к выбору энергосберегающих мероприятий в системах тягового электроснабжения (СТЭ) целесообразно создать систему выбора энергосберегающих мероприятий СТЭ, которая бы совместно с автоматизированной системой коммерческого учёта и контроля электроэнергии (АСКУЭ) могла бы оценить режим СТЭ и предложить наиболее выгодные мероприятия.

Структурная схема такой системы приведена на рис. 1.

Система включает в себя следующие составные элементы:

- Модель нагрузки системы электроснабжения;
- Модель потока поездов;
- Модель тарифа за потреблённую электроэнергию;
- Блок анализа надёжности переключающих устройств;
- Модель нагрузки нетяговых потребителей, получающих питание от шин тяговых подстанций;
- Модель выбора энергосберегающих мероприятий для обеспечения рациональных режимов системы электроснабжения;

- Модель системы внешнего электроснабжения

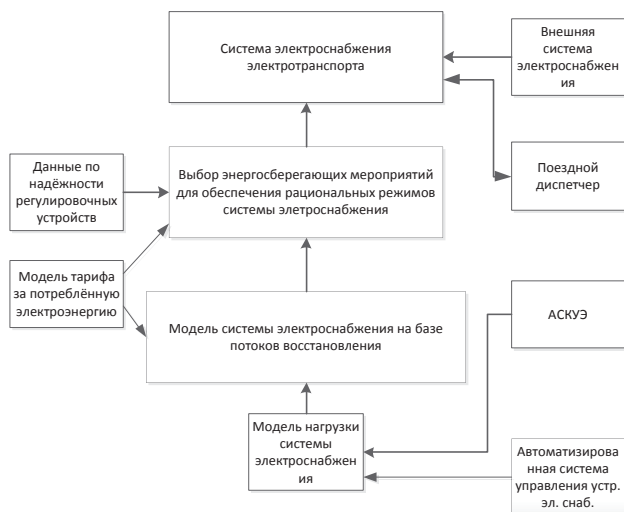


Рис. 1. Структурная схема системы выбора энергосберегающих мероприятий СТЭ

Современный этап функционирования СТЭ требует качественно новых подходов к выбору энергосберегающих мероприятий. Это объясняется следующими причинами:

- рыночные отношения в организации хозяйственной железнодорожного транспорта;
- возможные значительные перетоки мощности, обусловленные межсистемными связями;
- снижением показателей надежности основного силового оборудования через выработку ресурса;
- возможность расчётов за потреблённую электроэнергию по дифференцированным ценам, а также возможность расчётов по оптовым ценам;

Опыт эксплуатации СТЭ показал, что в нормальных режимах значения параметров, которые определяют условия надежности, качества, экономичности передачи и потребление электроэнергии близкие к предельным. Поэтому, если производить поиск энергосберегающих мероприятий только по экономическим соображениям, такой подход будет недостаточным. На наш взгляд необходимо расширить количество критериев и принимать решения не по одному частному критерию, а по всей совокупности критериев одновременно.

При этом необходимо определить необходимое и достаточное количество критериев. Существуют различные способы формирования набора критериев. Представляют наибольший интерес способы формирования набора критериев, которые базируются на

декомпозиции целей. Иерархия целей является основой для формирования и оценивания критериев.

Понятно, что многоцелевая структурная оптимизация режимов системы электроснабжения электроtransporta должна выполняться лишь для тех решений, которые технически осуществимы, с проверкой допустимости нормального режима. Последовательность решения задачи содержит такие этапы: структуризация целей и определение частных критериев; расчет уровней частных критериев; определение подмножества парето-оптимальных вариантов решений; построение однокритериальных функций ценности; определение однокритериальных функций полезности; обоснование принципа оптимальности и принятие конечного решения. Иерархия целей, которые можно технически реализовать, при управлении режимами СТЭ изображена на рис. 2. Цели могут быть распределены на следующие уровни.

1-й уровень. Высшая цель – рационализация работы системы электроснабжения электроtransporta, что обеспечивает в рыночных условиях в числе других факторов конкурентноспособность железнодорожного транспорта.

2-й уровень. Подцелями высшей цели являются: повышение надежности системы электроснабжения, качества электроэнергии, экономичности функционирования и улучшение экологических показателей (электромагнитная совместимость со смежными устройствами).

3-й уровень. В свою очередь, надежность системы электроснабжения зависит от совокупности таких основных свойств: безотказность электроснабжения, потребителей; ее живучесть. Качество электроэнергии определяется в основном по двум показателям – отклонениями от номинальных значений частоты и напряжения. Экономичность функционирования системы определяется уровнем затрат материальных, трудовых и финансовых ресурсов. И наконец, экологичность системы тягового электроснабжения определяется целым рядом показателей электромагнитной совместимости со смежными устройствами.



Рис. 2. Иерархия целей при выборе энергосберегающих мероприятий в системе электроснабжения тяги поездов

4-й уровень. Безотказность системы электроснабжения электротранспорта обеспечивается как безотказностью устройств тяговых подстанций, постов секционирования, пунктов параллельного соединения, так и безотказностью устройств контактной сети и сетей нетягового электроснабжения

Для представления задачи выбора энергосберегающих мероприятий в СТЭ будем использовать модель в виде графа. Сформулируем требования к структуре данного графа:

- верхняя вершина графа соответствует источнику электроэнергии (тяговые подстанции получают питание от районных подстанций энергосистемы);
- промежуточные вершины графа являются характерными точками системы электроснабжения, в которых происходит разделение потока электроэнергии (трансформаторные подстанции, контактная сеть, линии электропередачи);
- дуги графа представляют собой технические или организационные мероприятия, которые обеспечивают экономию электроэнергии при ее передаче или преобразовании на данном участке схемы. Заметим, что в общем случае таких дуг может быть несколько. При этом возможные мероприятия по экономии электроэнергии на электроподвижном составе не рассматриваются.

Вершины графа должны иметь и организационное назначение - определять, сколько мероприятий (дуг графа) может быть использовано для снижения потребления электроэнергии электроприемниками или же сокращения потерь при передаче через рассматриваемый элемент системы электроснабжения. Дуга графа должна иметь оценку или несколько оценок, показывающих эффективность и затраты на моделируемое мероприятие. Вид графа приведен на рис. 3.

Дуги 1-8 определяют мероприятия по экономии электроэнергии в тяговой сети, которые сводятся к подбору наиболее рациональной схемы электроснабжения фидерной зоны:

- узловая схема электроснабжения (дуга 1);
- параллельная схема электроснабжения (дуга 2);
- консольная схема электроснабжения (дуга 3);
- двухсторонняя схема электроснабжения (дуга 4).

Дуги 5-8 определяют аналогичные мероприятия для противоположной фидерной зоны.

Каждое из этих мероприятий имеет свой эффект, выражающийся в уменьшении потерь электроэнергии и эффект в стоимостном выражении. Из мероприятий 1-8 может быть применено только одно.

Дуги 9-12 определяют мероприятия, которые могут быть выполнены для повышения энергетических и экономических показателей системы электроснабжения на тяговой подстанции:

- переход на параллельную работу (или наоборот) выпрямительно-инверторных агрегатов (дуга 9);
- переход на параллельную работу (или наоборот) силовых понизительных трансформаторов (дуга 10);

- регулирование напряжения на шинах тяговых подстанций путём изменения коэффициента трансформации (дуга 11);
- регулирование напряжения вольтодобавочными устройствами.

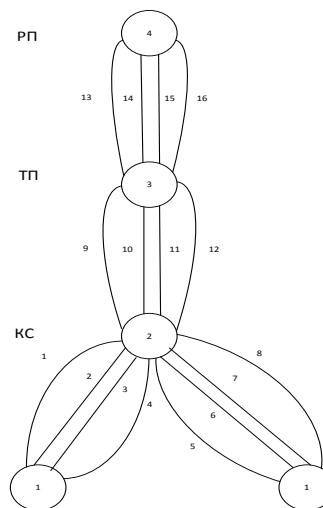


Рис. 3. Граф СТЭ для выбора энергосберегающих мероприятий

На тяговой подстанции имеется возможность выбора от одного до всех мероприятий, перечисленных выше.

Дуги 13-16 показывают возможные мероприятия по экономии электроэнергии в сетях внешнего электроснабжения.

- Корректировка показателей транспортного потока (дуга 13);
- Применение фильтрокомпенсирующих устройств (дуга 14);
- Применение активных фильтров (дуга 15);
- Применение компенсированных выпрямительно-инверторных агрегатов (дуга 16)

Представив процесс выбора энергосберегающих мероприятий в виде подобного графа, можно пройти от контактной сети к районной подстанции и определить получающиеся при этом уменьшение потерь электроэнергии и экономический эффект. Это позволяет оценить по выбранным критериям эффективность рассматриваемых мероприятий.

Определение затрат и эффекта можно получить при проходе по ветвям графа. Здесь два случая: нижний уровень (замена технологии) - выбор одного варианта из нескольких; верхний уровень - выбор одного или нескольких альтернативных вариантов.

Порядок выбора альтернативных вариантов можно предложить в следующем порядке:

- формирование множества альтернативных вариантов решения (альтернатив);
- формирование множества критериев оценки альтернатив;
- расчёт оценок альтернатив по каждому критерию;
- выбор лучшей альтернативы.

Рассматриваемые мероприятия по рационализации режимов системы электроснабжения могут быть организационные и технические.

Эффективность тех или иных мероприятий будем рассматривать по нескольким критериям в соответствии с иерархией целей определения рациональных режимов (рис. 2.).

Пусть M представляет собой множество всех мероприятий по энергосбережению, которые можно применить в системе электроснабжения электротранспорта. Множество мероприятий по энергосбережению M имеет такое свойство, что некоторые мероприятия можно применять вместе, а некоторые мероприятия по энергосбережению могут применяться только в одиночку. Поэтому разделим множество M на два непересекающихся подмножества M_1 и M_2 .

Положим, что множество M_1 включает в себя мероприятия, которые планируются в контактной сети. В результате выбора мероприятий из этого множества будет выбрано лишь одно мероприятие (это связано со спецификой схемы электроснабжения электропоезда. Не возможно в один и тот же момент применить несколько схем электроснабжения). Множество M_2 будет включать те мероприятия, которые будут реализовываться в элементах тяговых подстанций (силовых и тяговых трансформаторах, в выпрямительно-инверторных преобразователях) и в сети внешнего электроснабжения.

Каждому мероприятию поставим в соответствие стоимость этого мероприятия и эффект от внедрения (который в общем случае выражается в сокращении потерь электроэнергии в конкретном элементе системы электроснабжения электротранспорта). Пусть множество M_1 содержит k мероприятий, а множество M_2 – l мероприятий. Введём обозначение i – номер мероприятия по энергосбережению. Рассмотрим векторы $K_1(i)$ и $C_1(i)$ – векторы, которые содержат стоимости и выходные эффекты от внедрения мероприятий из множества M_1 . Аналогично определим векторы $K_2(i)$ и $C_2(i)$. Рассмотрим также векторы $X_1(i)$ и $X_2(i)$, элементы которых принимают значение 1 в случае, когда мероприятие по энергосбережению принимается и 0, когда мероприятие не принимается.

Принимая во внимание введённые обозначения, концепция решения задачи выбора мероприятий энергосберегающих мероприятий для обеспечения рациональных режимов в СТЭ может быть сформулирована как последовательность следующих шагов.

1. Формирование множества энергосберегающих мероприятий для обеспечения рациональных режимов системы электроснабжения электротранспорта.
2. Выбор из всего множества мероприятий альтернатив на основе метода анализа иерархий в соответствии с иерархией критериев.
3. Составление целевой функции, ограничений и граничных условий.

Математически данную задачу можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} M = M_1 \cap M_2 \\ F(x) = \sum_{i=1}^k C_1(i) \cdot x_1(i) + \sum_{i=1}^l C_2(i) \cdot x_2(i) \longrightarrow \min \quad (1) \\ \sum_{i=1}^k K_1(i) \cdot x_1(i) + \sum_{i=1}^l K_2(i) \cdot x_2(i) \leq K \end{array} \right.$$

Решение задачи (1) предлагается провести в 2 этапа в виде решения двух отдельных задач. Вначале в соответствии с иерархией управления режимами системы электроснабжения производится отбор энергосберегающих мероприятий и формируется множество M (первая задача). Для формирования множества M автором предложен инвариантно-согласованный метод анализа иерархий [17]. Затем (вторая задача) в соответствии с предложенным графом СТЭ производится выбор мероприятий для решения (1).

С помощью подхода к выбору энергосберегающих мероприятий, предложенной в данной статье, выбраны энергосберегающие мероприятия для СТЭ Донецкой железной дороги, где в связи с подготовкой к ЕВРО-2012 на основании решения системы (1) было предложено перевести тягу поездов на тяговых подстанциях ТП-Донецк и ТП-Красноармейск на уровень напряжения 35 кВ (с соответствующей заменой тяговых трансформаторов и преобразователей) [18]. Экономический эффект составил около 3 млн. грн.

4. Выводы

1. Предложена структурная схема системы выбора энергосберегающих мероприятий. Подчёркивается, что выбор энергосберегающих мероприятий необходимо производить по нескольким критериям в соответствии с иерархией целей. Предложена графовая модель для выбора мероприятий по энергосбережению в хозяйстве электрификации и электроснабжения, которая учитывает специфику систем электроснабжения тяги поездов.
2. Решение задачи выбора энергосберегающих мероприятий предложено проводить в 2 этапа в виде решения двух отдельных задач. Сначала в соответствии с иерархией целей управления режимами системы электроснабжения предложено провести отбор энергосберегающих мероприятий и сформировать множество M мероприятий (первая задача). Затем (вторая задача) по предложенному графу системы тягового электроснабжения предлагается произвести выбор мероприятий для решения (1).

Литература

1. Kothari, D. P. Power system optimization [Текст] / D.P. Kothari, J.S. Dhillon.-New Delhi:Prentice Hall of India,2007.-572 p.
2. Мирошниченко, Р. И. Режимы работы электрифицированных участков [Текст] / Р.И. Мирошниченко.-М:Транспорт,1982.-207с.
3. Доманский, В. Т. Система информационно-управляющего обеспечения рациональных режимов электропотребления электрифицированных линий железных дорог [Текст]:автор. дис....докт. техн. наук : 05.22.09 / Доманский Валерий Тимофеевич; [Моск. гос. ун-т путей сообщ.]-М.:1993.-48 с.

4. Доманский, В. Т. Энергооптимальная технология перевозочного процесса [Текст] / В.Т. Доманский, В.П. Кручина, А.П. Юшкевич // Железнодорожный транспорт.-1993.-№№5.-С.6-13.
5. Brodersen, R. W.Methods for true power minimization [Текст] / R.W. Brodersen, M.A. Horowitz, D. Markovic, B. Nikolic, V. Stojanovic // Computer Aided Design, 2002.ICCAD 2002.IEEE/ACM International Conference on.-10-11-2002.-P.35-42.
6. Hui-Jen, C.Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems using genetic algorithm [Текст] / С. Hui-Jen, С. Chao-Shun, L. Chia-Hung, С. Shi-Hong // Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES.-2005.-P.1-6.
7. Землянов, В. Б. Енергооптимальні технології аналізу та регулювання електроспоживання на тягу поїздів [Текст]:автореф. дис....канд. техн. наук : 05.22.09 / Землянов Володимир Борисович;[ДНУЗТ].-Д.:2000.-23 с.
8. Philipson, L.Understanding electric utilities and deregulation [Текст] / L. Philipson, H.L. Willis.-New York:CRC Press,2005.-520с.
9. Amjady, N. Energy price forecasting - problems and proposals for such predictions [Текст] / N. Amjady, M. Hemmati // Power and Energy Magazine, IEEE.-2006.-№2.-С.20-29.
10. A Framework for Electricity Price Spike Analysis With Advanced Data Mining Methods [Текст] / Zhao, J H та ін. // Power Systems, IEEE Transactions on.-2007.-№1.-С.376-385.
11. Nunes, C. Statistical models to predict electricity prices [Текст] / C. Nunes, A. Pacheco, T. Silva // Electricity Market, 2008.EEM 2008.5th International Conference on European.-28-5-2008.-С.1-6.
12. Bo, Y.An improved neural network prediction model for load demand in day-ahead electricity market [Текст] / Y. Bo, S. Yuanzhang // Intelligent Control and Automation, 2008.WCICA 2008.7th World Congress on.-25-6-2008.-С.4425-4429.
13. Землянов, В. Б. Интегрированная информационная технология перевода тяговых подстанций на многотарифную оплату за потребленную электроэнергию [Текст] / В.Б. Землянов, В.В. Скалозуб, В.В. Доманский // Залізничний транспорт.-2000.-№№3.-С.41-43.
14. Скалозуб, В. В. Исследование режимов ведения поездов с учетом переменных тарифов оплаты электроэнергии [Текст] / В.В. Скалозуб, Г.В. Евдомах, В.И. Дробаха // Системні технології.-2003.-№№3' (26).-С.142-150.
15. Скалозуб, В. В. Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости потребленной активной и реактивной электроэнергии [Текст] / В.В. Скалозуб, В.Г. Кузнецов, Д.А. Босый, А.П. Иванов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.-2008.-№4.-С.111-114.
16. Кузнецов, В. Г. Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электропоставки тяги поездов постоянного тока [Текст]:автореф. дис....докт. техн. наук : 05.22.09 / Кузнецов Валерий Геннадийович;[ДНУЗТ].-Д.:2012.-35 с.
17. Кузнецов, В. Г. Инвариантно-согласованный метод анализа иерархий в задачах планирования энергосберегающих мероприятий системы электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / В.Г. Кузнецов, В.И. Шинкаренко // Системні технології.-2011.-№6 (77).-С.77-85.
18. Бітюков, С. Д. Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів [Текст] / С.Д. Бітюков, В.Г. Кузнецов, В.Г. Сиченко, Т.І. Кирилюк // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту.-2011.-№122.-С.93-100.