

УДК 007.51+621.331
ББК 31.27-01

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Крюков А. В.¹, Закарюкин В. П.², Абрамов Н. А.³
(Иркутский государственный университет
путей сообщения, Иркутск)

Предложен метод управления режимами систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока, использующий ситуационный подход. На основе компьютерного моделирования показана применимость метода для решения практических задач управления сложной системой тягового электроснабжения магистральной железной дороги.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения, управление режимами, ситуационный подход.

1. Введение

Система тягового электроснабжения (СТЭ) железных дорог переменного тока представляет собой нелинейный динамический объект, отличающийся многорежимностью. Последний фактор существенно усложняет оперативное управление СТЭ. Преодоление указанной трудности возможно на основе использования концепции ситуационного управления (СУ). При этом под ситуационным можно понимать управление, основанное на выявлении проблемных ситуаций и преобразовании имеющейся

¹ Андрей Васильевич Крюков, член-корр. АН ВШ РФ, доктор технических наук, профессор (and_kryukov@mail.ru).

² Василий Пантелеймонович Закарюкин, кандидат технических наук, доцент (zakar@irk.ru).

³ Никита Андреевич Абрамов, аспирант (Abramov_na@irgups.ru).

информации в управляющие воздействия, направленные на их разрешение [8, 9].

При учете электромагнитных и электромеханических переходных процессов система электроснабжения железнодорожной магистрали представляет собой сложный нелинейный динамический объект, для формального описания которого может быть использована следующая модель:

$$(1) \quad \mathbf{X}(t) = \Phi_t[\mathbf{C}(t), \mathbf{V}(t), \mathbf{S}(t)],$$

где $\mathbf{X}(t)$ – n -мерный вектор параметров, характеризующих режим СТЭ; Φ_t – нелинейный динамический оператор, в общем случае зависящий от времени; $\mathbf{V}(t)$ – m -мерный вектор возмущающих воздействий; $\mathbf{C}(t)$ – ℓ -мерный вектор управлений; $\mathbf{S}(t)$ – p -мерный вектор структурных параметров. Вектор \mathbf{X} обычно формируется из модулей и фаз напряжений в узловых точках СТЭ. В состав вектора \mathbf{V} включают потребляемые (генерируемые) активные и реактивные мощности. Вектор \mathbf{S} образуют бинарные параметры, характеризующие положение коммутационных аппаратов. Вектор управлений \mathbf{C} включает задания на генерацию (потребление) реактивной мощности регулируемыми установками продольной и поперечной компенсации. В качестве параметров $\mathbf{X}(t)$ используются декартовы (U'_i, U''_i) или полярные координаты (U_i, δ_i) узловых напряжений. Параметры $\mathbf{V}(t)$ представляют собой изменяющиеся во времени и перемещающиеся в пространстве активные P_i и реактивные Q_i тяговые нагрузки. Вектор управлений $\mathbf{C}(t)$ формируется на основании детерминированного или случайного графика движения поездов, а также команд, поступающих из энергодиспетчерского центра дороги.

2. Методика моделирования

Ввиду большой размерности, сложности и недостаточной информационной обеспеченности СТЭ практическое использование модели (1) на современном этапе не представляется возможным. Поэтому для определения режимов СТЭ применяют имитационные методы. При этом используется концепция

мгновенных схем и осуществляется редукция динамической модели (1) к набору статических. Для выполнения процедуры моделирования исследуемый интервал T_M разбивается на малые промежутки Δt , внутри которых параметры \mathbf{X} , \mathbf{S} , \mathbf{C} и \mathbf{V} принимаются неизменными.

На каждом интервале Δt осуществляется решение следующей системы нелинейных уравнений, описывающей установившийся режим соответствующей мгновенной схемы:

$$\mathbf{F}[\mathbf{X}_k, \mathbf{S}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{V}_k] = \mathbf{0},$$

где $\mathbf{X}_k, \mathbf{S}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{V}_k$ – значения векторов $\mathbf{X}, \mathbf{S}, \mathbf{C}, \mathbf{V}$ для k -ой мгновенной схемы.

Создание имитационной модели СТЭ требует построения моделей ее элементов с определением алгоритма их взаимодействия и включает следующие составные части:

- моделирование графика движения поездов;
- формирование мгновенных схем и расчет режима для каждой из них;
- выборка результатов расчета и определение интегральных показателей имитационного моделирования.

Наиболее эффективно задача расчета режимов СТЭ может быть решена на основе применения фазных координат. Основную трудность при описании СТЭ в фазных координатах создают статические многопроводные элементы (СМЭ) со взаимноиндуктивными связями, к которым относятся линии электропередачи (ЛЭП) и трансформаторы. В работе [3] предложен единый методологический подход к построению моделей СМЭ, реализуемых решетчатыми схемами замещения в виде наборов RLC -элементов, соединенных по схеме полного графа.

3. Ситуационное управление режимами СТЭ

В качестве исполнительных элементов для управления режимами СТЭ могут использоваться следующие устройства управления (УУ):

- регулируемые установки поперечной компенсации реак-

тивной мощности (РПКРМ) [2, 6];

- регулируемые установки продольной компенсации [2, 6];
- накопители энергии (сверхпроводниковые индуктивные и емкостные) [12];
- активные кондиционеры гармоник [11];
- регулируемые вольтодобавочные трансформаторы [1];
- синхронные и асинхронизированные генераторы установок распределенной генерации, снабженные устройствами автоматического регулирования возбуждения [4].

Основные задачи, решаемые с помощью перечисленных УУ, могут быть сформулированы следующим образом:

- стабилизация уровня напряжения в тяговой сети;
- уменьшение потерь электроэнергии в ТС;
- снижение отклонений напряжения на шинах 110–220 кВ и 6–10–35 кВ ТП;
- снижение несимметрии напряжения на шинах 110–220 кВ и 6–10–35 кВ тяговых подстанций (ТП);
- снижение уровня несинусоидальности кривых напряжения на шинах 110–220 кВ и 6–10–35 кВ ТП.

Структурная схема управления режимами СТЭ представлена на рис. 1.

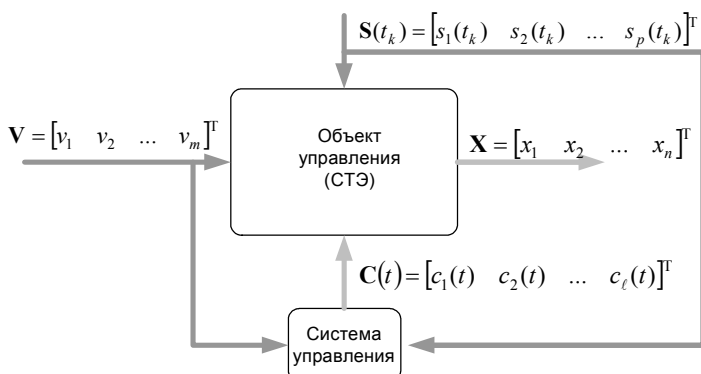


Рис. 1. Структурная схема управления режимами СТЭ

Предварительный этап ситуационного управления состоит в обобщении и классификации ситуаций, возникающих в процессе функционирования объекта управления. Для решения задачи может использоваться математический аппарат нечеткой кластеризации [7].

Алгоритм СУ включает следующие блоки (рис. 2):

1) блок оценивания состояния СТЭ, на основании которого формируются векторы $\mathbf{V}(t_k)$, $\mathbf{S}(t_k)$; первый вектор образуют активные мощности, потребляемые тяговыми подстанциями, во второй входят бинарные параметры, характеризующие положение коммутационных аппаратов на ТП, постах секционирования и пунктах параллельного соединения участков контактной сети;

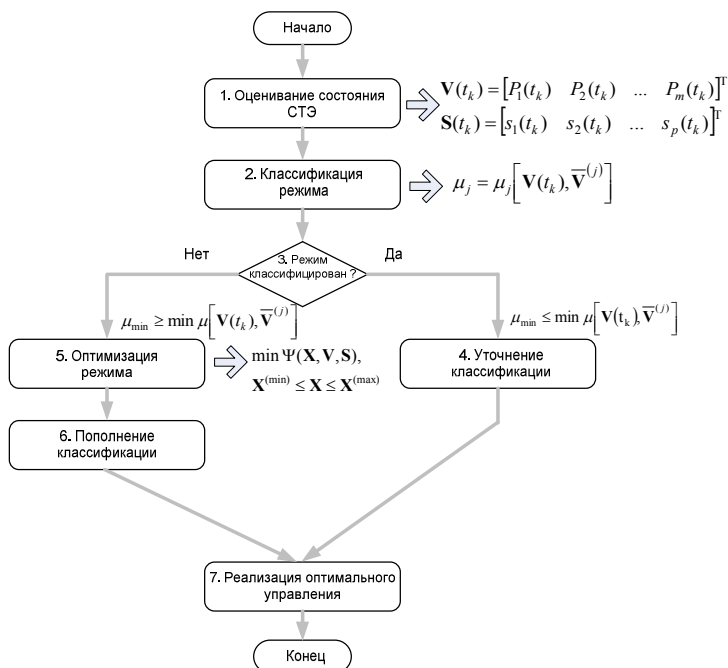


Рис. 2. Блок-схема алгоритма ситуационного управления

2) блок классификации режима, осуществляемой на основе определения функции принадлежности $\mu \left[\mathbf{V}(t_k), \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right]$ текущего режима $\mathbf{V}(t_k)$ нечетким множествам (кластерам), определяемым центрами (типичными представителями) $\bar{\mathbf{V}}^{(j)}$, найденными на предварительном этапе;

3) логический блок, определяющий успешность классификации по условию

$$(2) \quad \mu_{\min} \leq \min \mu \left[\mathbf{V}(t_k), \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right],$$

где μ_{\min} – величина, определяющая погрешность классификации;

4) блок уточнения классификации путем проведения процедуры кластеризации с учетом параметров $\mathbf{V}(t_k)$; переход к блоку происходит, если условие (2) выполнено, что означает возможность отнесения текущего режима к одной из выявленных на этапе кластеризации режимных ситуаций; далее на основе выполненной ранее оптимизации режима для выявленной режимной ситуации происходит реализация оптимального управления, отвечающего экстремуму функционала $\Psi(\mathbf{X}, \mathbf{V}, \mathbf{S})$;

5) если условие (2) не выполняется, то происходит переход к блоку оперативной оптимизации управления, затем выполняется пополнение классификации и реализация управления.

4. Результаты моделирования

Из приведенного описания видно, что успешность реализации алгоритма СУ прежде всего зависит от возможности классификации и обобщения большого многообразия режимных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации систем тягового электроснабжения. Для подтверждения такой возможности проведено моделирование режимов СТЭ участка магистральной железной дороги (рис. 3). Моделирование проводилось с помощью программного комплекса «Fazonord–Качество», разработанного в ИрГУПСе [10]. В целях упрощения интерпретации

результатов моделирования рассматривался типичный случай оснащения СТЭ устройствами управления режимами, когда пост секционирования оснащается установкой РПКРМ, выполненной с использованием современных средств силовой электроники [6].

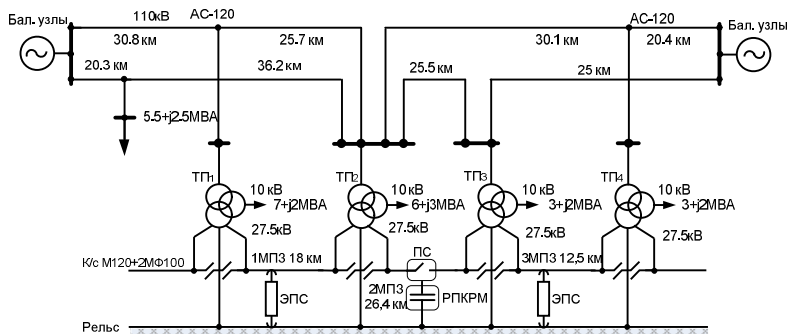


Рис. 3. Схема моделируемого участка железнодорожной магистрали: ПС – пост секционирования

Классификация режимов осуществлялась на основе параметров, включающих в свой состав активные мощности, потребляемые по плечам питания тяговых подстанции рассматриваемого участка. Кластеризация выполнялась для каждой из межподстанционной зоны (МПЗ) на основе активных мощностей левого и правого плеча питания ($P_{лев}$, $P_{пр}$). Разведочный анализ показал, что данные могут быть сгруппированы в два кластера.

Кластеризация проведена методом нечетких k -средних (FCM) [7]. При этом для заданного множества K входных векторов V_k и N выделяемых кластеров с центрами $\overline{V}^{(j)}$ предполагается, что любой V_k принадлежит любому кластеру с принадлежностью μ_{jk} интервалу $[0, 1]$, где j – номер кластера, а k – номер входного вектора.

Вводятся следующие условия нормирования для μ_{jk} :

$$(3) \quad \sum_{j=1}^N \mu_{jk} = 1, \quad k = 1, \dots, K; \quad 0 < \sum_{j=1}^N \mu_{jk} \leq K, \quad j = 1, \dots, N.$$

Цель алгоритма – минимизация суммы всех взвешенных расстояний $\left\| \mathbf{V}_k - \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right\|$:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \left\| \mathbf{V}_k - \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right\| \rightarrow \min,$$

где $q > 1$ – экспоненциальный вес.

Достижение цели возможно путем решения следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial \mu_{jk}} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \left\| \mathbf{V}_k - \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right\| \right) = \mathbf{0};$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{\mathbf{V}}^{(j)}} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \left\| \mathbf{V}_k - \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right\| \right) = \mathbf{0}.$$

Совместно с условиями (3) из решения этой системы можно получить

$$\bar{\mathbf{V}}^{(j)} = \frac{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \mathbf{V}_k}{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q}; \quad \mu_{jk} = \frac{1}{\left\| \mathbf{V}_k - \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right\|^{\frac{1}{q-1}} \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{\left\| \mathbf{V}_k - \bar{\mathbf{V}}^{(j)} \right\|^{\frac{1}{q-1}}} \right)}.$$

Достоинством такой постановки задачи является естественная интерпретация как искомым нечетких кластеров, так и их центров, которые также находятся в результате решения поставленной задачи [7]. На каждой из итераций рекуррентно пересчитываются значения функций принадлежности нечетких кластеров и их центры.

Результаты кластеризации для второй межподстанционной зоны (2МПЗ) представлены на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что из более чем ста режимов можно выделить две режимных ситуации, для каждой из которых может быть назначена рациональная стратегия управления (рис. 5).

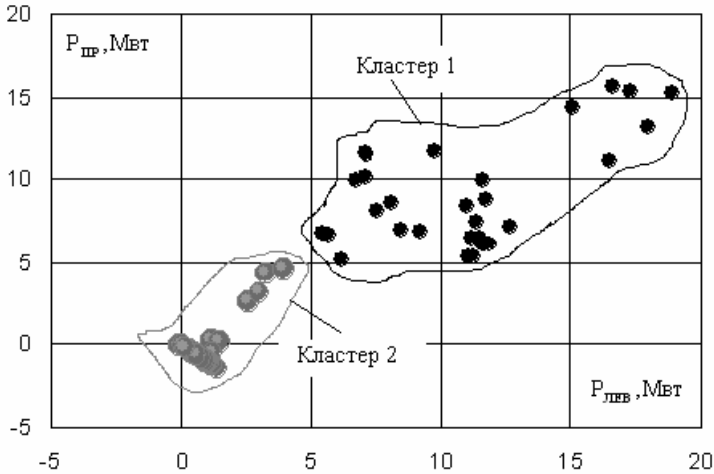


Рис. 4. Результаты кластеризации для второй МПЗ

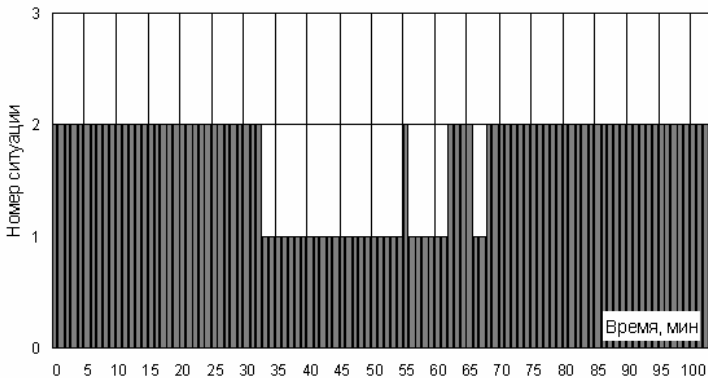


Рис. 5. Результаты ситуационного анализа режимов

Для определения эффективности предлагаемого метода управления СТЭ проведено имитационное моделирование режимов системы в двух вариантах:

- управление не осуществляется;
- производится управление режимами на основе описанного выше алгоритма; при этом в качестве исполнительного устройства используется установка поперечной компенсации реактивной мощности, смонтированная на посту секционирования второй МПЗ.

Результаты моделирования представлены на рис. 6. Полученные результаты позволяют сделать вывод том, что на основе ситуационного управления могут быть решены актуальные режимные задачи.



Рис. 6. Напряжение на токоприемнике ЭПС

При отсутствии управления на 49–52 минутах движения напряжение на токоприемнике электровоза становится ниже допустимого. С помощью ситуационного управления устройством РПКРМ, установленным во второй МПЗ, уровень напряжения входит в допустимые пределы на всем моделируемом интервале времени.

5. Заключение

1. На основе имитационного моделирования и нечеткого кластерного анализа показано, что мгновенные режимы системы тягового электроснабжения могут быть разбиты на сравнительно однородные группы (кластеры). Такой прием значительно упрощает анализ и позволяет реализовать концепцию ситуационного управления режимами СТЭ.

2. Результаты моделирования позволяют сделать вывод том, что на основе ситуационного управления могут быть решены актуальные практические задачи управления режимами систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока.

Литература

1. АРЖАННИКОВ Б. А., ГРИГОРЬЕВ В. Ф., ПЫШКИН А. А. и др. *Регулируемый трансформаторный агрегат электрифицированных железных дорог переменного тока* // Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 32–41.
2. БОРОДУЛИН Б. М., GERMAN Л. А., НИКОЛАЕВ Г. А. *Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог*. – М.: Транспорт. – 1983. – 184 с.
3. ЗАКАРЮКИН В. П., КРЮКОВ А. В. *Сложнонесимметричные режимы электрических систем*. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. – 273 с.
4. КРЮКОВ А. В., ЗАКАРЮКИН В. П., АРСЕНТЬЕВ М. О. *Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте* // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – №3(19). – С. 81–87.
5. КРЮКОВ А. В., ЗАКАРЮКИН В. П., АСТАШИН С. М. *Управление режимами систем тягового электроснабже-*

- ния / Под ред. А. В. Крюкова.– Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009. – 104 с.
6. КУРО Ж. *Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении* // Новости электротехники. – 2005. – №1(31). – URL: <http://news.elteh.ru/arh>.
 7. ЛЕОНЕНКОВ А. В. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH*. – СПб.: БХВ, 2003.
 8. ПАНТЕЛЕЕВ В. Н., ТУЛИКОВ А. Н. *Методы искусственного интеллекта в управлении режимами систем электроснабжения предприятий* // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Томск. – 2008. –№1–17. – С. 93–105.
 9. ПОСПЕЛОВ Д. А. *Ситуационное управление: теория и практика*. – М.: Наука, 1985.
 10. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество / Закарюкин В. П., Крюков А. В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.
 11. УШАКОВ В. А., МАШУТИН С. Н. *Фильтрация высших гармоник тока электровозов в системах тягового электроснабжения* // Политранспортные системы. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2007. – С. 49–54.
 12. ШЕВЛЮГИН М. В. *Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии*. - Автореф. дисс. ... д-р техн. наук. – М.: МИИТ, 2009. – 48 с.

CONTROL OF RAILWAY ELECTRIC SYSTEMS

Andrey Kryukov, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, associating member of High School Academy of Sciences, Doct. Sc., professor (and_kryukov@mail.ru).

Vasiliy Zakaryukin, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, docent, Cand. Sc. (zakar@irk.ru, (83952)638345).

Nikita Abramov, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, post graduator (Abramov_na@irgups.ru).

Abstract: The method is proposed for alternate-current railway electric systems control. The method is based on the contingency approach. Applicability of this method for real-life control problems in complex main-line railroad electric systems is verified by computer simulation.

Keywords: railway electric systems, regime control, contingency approach.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Д. А. Новиковым*