

Ситуационное управление режимами систем тягового электроснабжения на основе методов нечеткой кластеризации

Крюков А.В., д-р техн. наук, Закарыкин В.П., канд. техн. наук, Абрамов Н.А., асп.

Предложен метод ситуационного управления режимами систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока, основанный на использовании процедуры нечеткой кластеризации. На основе кластеризации из большой совокупности режимов выделяется 16 ситуаций, для каждой из которых может быть назначена рациональная стратегия управления.

Ключевые слова: системы тягового электроснабжения, ситуационное управление, нечеткая кластеризация.

Situation Control of Modes of Railway Electric Supply System Based on Fuzzy Clusterization Methods

A.V. Kryukov, Doctor of Engineering, V.P. Zakaryukin, Candidate of Engineering, N.A. Abramov, Post Graduate Student

The article describes a method of situation control of the modes of traction power supply systems on railways based on a fuzzy clusterization process. 16 situations assigned can be evolved from a big array of modes based on the clusterization. A rational control strategy can be applied for each situation.

Keywords: railway electric supply systems, situation control, fuzzy clusterization.

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 информации в управляющие воздействия, направленные на их разрешение [1, 2].

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:

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

где $\mathbf{X}(t)$ – n -мерный вектор параметров, характеризующих режим СТЭ; \mathbf{W}_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 в СТЭ. Вектор управлений \mathbf{C} включает задания на генерацию (по-

требление) реактивной мощности регулируемые установками продольной и поперечной компенсации, а также положения анцапф устройств регулирования напряжения (РПН) под нагрузкой. В качестве параметров $\mathbf{X}(t)$ обычно используются декартовы (U_i, U_i'') или полярные (U_i, δ_i) координаты 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. С использованием вектора $\mathbf{S}(t)$ осуществляется формирование математической модели СТЭ в виде матрицы \mathbf{Y}_S .

Постановка задачи и методика моделирования. Реализация алгоритмов управления требует, прежде всего, построения адекватной математической модели СТЭ. 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 моделей. 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 нелинейной системы уравнений, описывающей установившийся режим соответствующей мгновенной схемы:

$$F[X_k, S_k, C_k, V_k] = 0,$$

где X_k, S_k, C_k, V_k – значения векторов X, S, C, V для k -й 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;
- выборку 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 (рис. 1), к которым относятся линии электропередачи (ЛЭП) и трансформаторы. В работе [4] предложен единый методологический подход к построению моделей СМЭ, реализуемых решетчатыми схемами замещения в виде наборов RLC-элементов, соединенных по схеме полного графа.

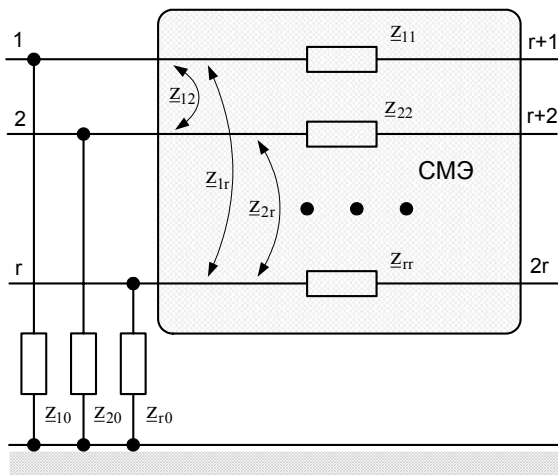


Рис. 1. Схема СМЭ

На первом этапе моделирования матрица проводимостей, используемая для получения решетчатой схемы СМЭ, формируется без учета фактического соединения отдельных проводов или обмоток на основе следующего матричного преобразования:

$$Y_{PC} = M_0 Z^{-1} M_0^T = \begin{bmatrix} D & -D \\ -D & D \end{bmatrix},$$

где Y_{PC} – матрица размерностью $2r \times 2r$;

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1r} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{r1} & Z_{r2} & \dots & Z_{rr} \end{bmatrix} \text{ – исходная матрица}$$

сопротивлений элемента размерностью $r \times r$, учитывающая взаимные индуктивные связи между проводами; $Z_{jk} = Z_{kj}$; $D = Z^{-1}$; r – исходное число проводов элемента; M_0 – топологическая матрица, определяемая на основе соотношения $M_0 = \begin{bmatrix} E_r \\ -E_r \end{bmatrix}$, E_r – единичная матрица размерностью $r \times r$.

В развернутом виде матрица Y_{PC} может быть представлена следующим образом:

$$Y_{PC} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1,2r} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2,2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{2r,1} & y_{2r,2} & \dots & y_{2r,2r} \end{bmatrix},$$

где параметры y_{ij} отвечают взятым с обратным знаком проводимостям отдельных ветвей решетчатой схемы (рис. 2), соединяющих между собой узлы, номера которых соответствуют номерам строк и столбцов матрицы; $y_{kj} = y_{jk}$;

$$y_{kk} = -\sum_{j=1}^r y_{kj}.$$

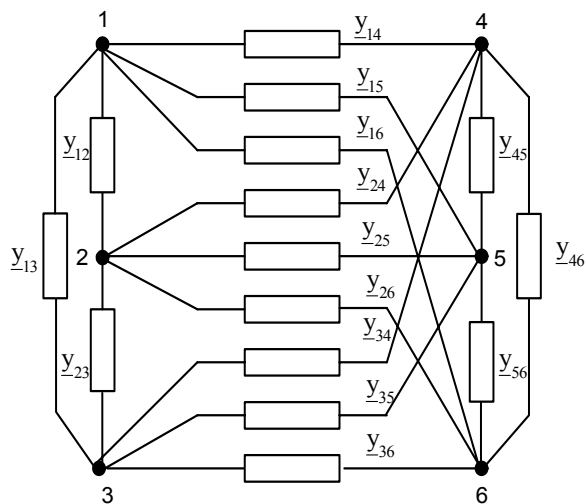


Рис. 2. Решетчатая схема замещения для трехпроводного элемента

При отсутствии в элементе связей с узлом нулевого потенциала (землей), т.е. $Z_{k0} = \infty$, $k = 1 \dots r$, матрица Y_{PC} является r -кратно вырожденной, что не препятствует использованию модели в расчетах. После формирования расчетной схемы сети путем объединения моделей нескольких элементов и исключения уравнений, от-

вечающих базисным узлам, матрица проводимостей сети становится хорошо обусловленной.

Для учета емкостных проводимостей необходимо дополнить полученную схему соответствующими шунтами и ветвями. Последние можно найти из потенциальных коэффициентов первой группы формул Максвелла:

$$\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{T},$$

где $\mathbf{U} = [U_1 \quad U_1 \quad \dots \quad U_r]^T$ – вектор напряжений провод–земля; $\mathbf{T} = [\tau_1 \quad \tau_1 \quad \dots \quad \tau_r]^T$ – вектор зарядов проводов;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{1r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{r1} & \dots & \alpha_{rr} \end{bmatrix} \text{ – матрица потенциальных}$$

коэффициентов.

На основе матрицы $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}$ могут быть вычислены собственные и взаимные частичные емкости. При этом матрица \mathbf{B} преобразуется к следующему виду:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \mathbf{e}^T & -b_{12} & \dots & -b_{1r} \\ -b_{21} & \mathbf{B}_2 \mathbf{e}^T & \dots & -b_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -b_{r1} & -b_{r2} & \dots & \mathbf{B}_r \mathbf{e}^T \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{B}_k = (b_{k1} \quad b_{k2} \quad \dots \quad b_{kr})$, $k = 1 \dots r$; $k \neq r$; $\mathbf{e} = (1 \quad 1 \quad \dots \quad 1)$ – вектор-строка размерностью r , состоящая из единиц.

В узлы решетчатой схемы добавляются шунты, сопротивления которых определяются половиной соответствующей собственной емкости. Кроме того, с каждой стороны системы проводов формируются дополнительные ветви с сопротивлениями, рассчитываемыми по половинным значениям соответствующих взаимных емкостей. В результате матрица $\underline{\mathbf{Y}}_{PC}$ преобразуется к новому виду, который можно обозначить как $\underline{\mathbf{Y}}_C$:

$$\underline{\mathbf{Y}}_C = \underline{\mathbf{Y}}_{PC} - i\omega \mathbf{C}_Y,$$

$$\text{где } \mathbf{C}_Y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & \mathbf{C} \end{bmatrix}; \quad \omega = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Следует отметить, что матрица $\underline{\mathbf{Y}}_C$, в отличие от $\underline{\mathbf{Y}}_{PC}$, является невырожденной и может непосредственно использоваться в расчетах режимов, например, для схемы, состоящей из одного СМЭ.

На основе схемы соединений проводов конкретного элемента выполняется преобразование матрицы $\underline{\mathbf{Y}}_C$ путем объединения соответствующих узлов и сложения образующихся при этом параллельных ветвей решетчатой схемы. Указанное преобразование можно проиллюстрировать следующим образом. Предпо-

ложив без потери общности, что объединяемые узлы имеют последние номера, можно разделить матрицу $\underline{\mathbf{Y}}_C$ на блоки:

$$\underline{\mathbf{Y}}_C = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_1 & \underline{\mathbf{Y}}_{12} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{12}^T & \underline{\mathbf{Y}}_2 \end{bmatrix},$$

где $\underline{\mathbf{Y}}_2$ – блок размерностью $k \times k$, отвечающий объединяемым узлам.

Тогда преобразованную матрицу $\underline{\mathbf{Y}}_S$ можно представить в следующем виде:

$$\underline{\mathbf{Y}}_S = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_1 & \underline{\mathbf{Y}}_{12} \mathbf{e}_k \\ \mathbf{e}_k^T \underline{\mathbf{Y}}_{12}^T & \mathbf{e}_k^T \underline{\mathbf{Y}}_2 \mathbf{e}_k \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{e}_k = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T$ – k -мерный вектор, состоящий из единиц.

Ситуационное управление режимами СТЭ. В качестве исполнительных элементов (рис. 3) для управления режимами СТЭ могут использоваться следующие устройства:

- регулируемые установки поперечной компенсации реактивной мощности;
- регулируемые установки продольной компенсации;
- блоки автоматического регулирования коэффициента трансформации (АКРТ);
- сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии;
- емкостные накопители энергии;
- активные кондиционеры гармоник;
- регулируемые вольтодобавочные трансформаторы [5];

– синхронные и асинхронизированные генераторы установок распределенной (собственной) генерации, снабженные устройствами автоматического регулирования возбуждения.

Устройства АКРТ, широко применяемые в электрических сетях общего назначения, имеют ограниченное применение в тяговых сетях (ТС). Это связано со следующими факторами:

- большой скоростью изменения напряжения в ТС и значительным размахом его отклонений по сравнению с аналогичными параметрами для сетей общего назначения;
- недостаточно высокой надежностью устройств регулирования под нагрузкой тяговых трансформаторов (ТТ).

В силу указанных причин, изменение коэффициентов трансформации ТТ следует применять для достаточно редкой коррекции режима в СТЭ.

На рис. 3 показан полный набор возможных устройств управления (УУ) режимами СТЭ. Размещение всего комплекса УУ на каждой ТП и посту секционирования не приемлемо по экономическим и технологическим соображениям, так как многие из них дублируют друг друга.

2) блок классификации режима, осуществляемой на основе определения функции принадлежности $\mu[\mathbf{V}(t_k), \bar{\mathbf{V}}^{(j)}]$ 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 условиям

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

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) блок оперативной оптимизации управления, переход к которому осуществляется, если условие (2) не выполняется. Затем выполняется пополнение классификации и реализация управления.

Результаты нечеткой кластеризации.

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 реального участка Восточно-Сибирской железной дороги. В состав СТЭ входит 7 тяговых подстанций (ТП). Моделирование проводилось с помощью программного комплекса «Fazonord-Качество», разработанного в ИргУПСе [6].

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 плеч питания ($P_{лев}$, $P_{прав}$). Для унификации данных проведена их нормализация. Для нормализованных данных проведен разведочный анализ, который показал, что данные могут быть сгруппированы в четыре кластера. Кластеризация проведена методом нечетких k -средних (FCM), описанным в работе [7].

Взаимосвязь между кластерным анализом и теорией нечетких множеств основана на

том факте, что при решении задач структурирования сложных систем большинство формируемых классов размыты по своей природе. Размытость проявляется в том, что переход от принадлежности к непринадлежности элементов к данным классам является постепенным, а не скачкообразным. Требование нахождения однозначной кластеризации элементов исследуемой проблемной области является достаточно жестким, особенно при решении слабо структурируемых задач, к которым относится задача кластеризации режимов СТЭ. Методы нечеткой кластеризации ослабляют это требование. Ослабление осуществляется за счет введения в рассмотрение нечетких кластеров и соответствующих им функций принадлежности μ , лежащих в интервале 0–1.

Результаты кластеризации для одной МПЗ представлены на рис. 6.

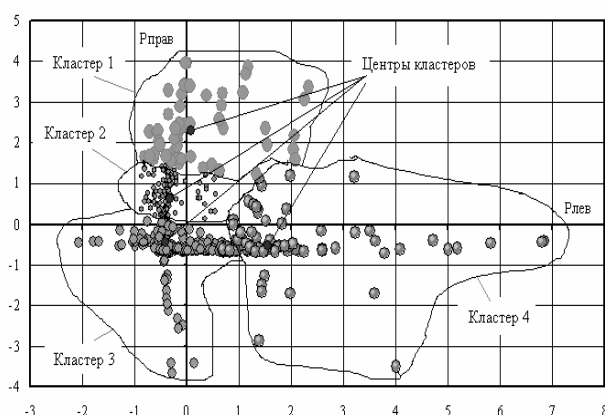


Рис. 6. Результаты кластеризации для одной МПЗ

Объективная оценка качества кластеризации проведена с использованием объясненной доли общего разброса T на основе методики, изложенной в работе [8]. Полученное значение T , равное 0,68, свидетельствует о приемлемом качестве разбиения режимов на кластеры.

Несмотря на отдельное выполнение процедуры кластеризации для каждой МПЗ, координированное управление режимом СТЭ может быть обеспечено на основе комбинаторного анализа. При четырех ситуациях (кластерах) на смежных МПЗ для тяговой подстанции будет иметь место 16 различных ситуаций (см. таблицу, рис. 7).

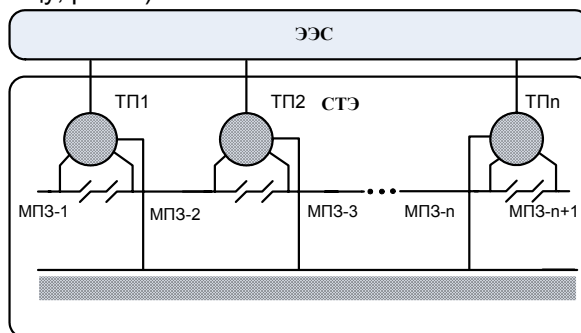


Рис. 7. Пример построения СТЭ

Пример ситуационного анализа для одной из ТП рассматриваемого участка представлен на рис. 8.

Комбинаторный анализ ситуаций на ТП			
№	Ситуации на смежных МПЗ		Ситуация на ТП
	Левая	Правая	
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	5
6	2	2	6
7	2	3	7
8	2	4	8
9	3	1	9
10	3	2	10
11	3	3	11
12	3	4	12
13	4	1	13
14	4	2	14
15	4	3	15
16	4	4	16

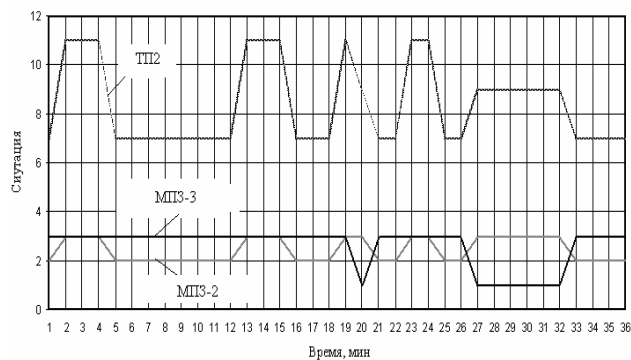


Рис. 8. Ситуационный анализ для ТП2

Заключение

С помощью имитационного моделирования и нечеткого кластерного анализа показано, что мгновенные режимы системы тягового электроснабжения могут быть разбиты на срав-

нительно однородные группы (кластеры). Такой прием значительно упрощает анализ и позволяет реализовать концепцию ситуационного управления режимами СТЭ.

Качество кластеризации подтверждается с помощью расчетов объективных критериев.

3. На основе кластеризации по межподстанционным зонам и комбинаторного анализа из большой совокупности режимов выделяется 16 ситуаций для объекта управления, для каждой из которых может быть назначена рациональная стратегия управления.

Список литературы

1. **Поспелов Д.А.** Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1985.
2. **Пантелеев В.Н., Туликов А.Н.** Методы искусственного интеллекта в управлении режимами систем электроснабжения предприятий // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – № 1–17. – Томск, 2008. – С. 93–105.
3. **Крюков А.В., Закарюкин В.П., Асташин С.М.** Управление режимами систем тягового электроснабжения / Под ред. А.В. Крюкова. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009.
4. **Закарюкин В.П., Крюков А.В.** Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005.
5. **Регулируемый** трансформаторный агрегат электрифицированных железных дорог переменного тока / Б.А. Аржанников, В.Ф. Григорьев, А.А. Пышкин и др. // Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 32–41.
6. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков; Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.
7. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ, 2003.
8. **Айвазян С.А.** Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989.

Крюков Андрей Васильевич,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
член-корр. АН ВШ РФ, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжение железнодорожного транспорта,
телефон (3952) 63-83-47,
адрес: г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, кабинет Д201,
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Закарюкин Василий Пантелеймонович,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжение железнодорожного транспорта,
e-mail: zakar@irk.ru

Абрамов Никита Андреевич,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
аспирант,
e-mail: Abramov_na@irgups.ru