

Гришко А.К. Прогнозирующее управление в многоуровневых слабоструктурированных системах на основе когнитивного подхода. // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. статей XV Междунар. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2015. – С. 26-34.

УДК 519.71

## ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ В МНОГОУРОВНЕВЫХ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНОГО ПОДХОДА

А.К. Гришко

### PREDICTIVE CONTROL IN MULTI-LEVEL SEMI-SYSTEMS BASED COGNITIVE APPROACH

A.K. Grishko

**Аннотация.** На основе когнитивного анализа предлагается методика формирования системы многопараметрического прогнозирования, построенной по сетевой модели.

**Ключевые слова:** прогнозирующее управление, система, когнитивный подход.

**Abstract.** On the basis of cognitive analysis of the technique of forming a system of multi-parameter prediction constructed from the network model.

**Keywords:** predictive control, system, cognitive approach.

В современных рыночных условиях для энергоснабжающей организации в регионе важно обеспечивать надежность электроснабжения потребителей, поддержание качества электроэнергии, недопущение аварийных режимов и т.д. Для выполнения всех этих требований при планировании и контроле электропотребления необходимо использование систем прогнозирования электроэнергии [1–3], которые будут реализовывать эффективные модели процесса, получая данные о потреблении от автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии.

На сегодняшний день прогнозирование является актуальной темой исследований в электроэнергетике, так как оно занимает важное место в задачах планирования и управления режимами электроэнергетических систем. Прогнозные оценки электропотребления представляют собой основную информацию для принятия решений о планировании потребления электроэнергии предприятиями и развития электроснабжения в регионе, для эффективного управления которой лицу, принимающему решения, необходима система принятия решений [3–5]. Повышение точности прогнозных оценок электропотребления обеспечивает экономию энергетических ресурсов и соответствующее увеличение прибыли энергетических предприятий.

Математические модели процессов должны учитывать сложность современных систем электроснабжения, являющихся многоуровневыми системами с множеством взаимосвязей, поведение которых определяется изменением целой совокупности внешних и внутренних факторов [6–8]: технологических, экономических, метеорологических, структурных и иных. Они определяют такие закономерности электропотребления, как сезонность, недельная цикличность, изменчивость утренних и вечерних максимумов, температурная зависимость,

зависимость от освещенности, длительности светлого времени суток и т.п. Поэтому энергосистему, как правило, относят к сложной системе.

В связи с этим в процессе разработки управленческих решений появляется ряд основных характерных проблем, связанных в первую очередь с многофакторностью происходящих процессов, имеющих сложную структуру взаимосвязи, которую необходимо рассматривать в совокупности происходящих в ней событий, а также изменчивостью процессов во времени. При исследовании сложной системы описать ее традиционно в виде достоверной математической модели не представляется возможным из-за сложной структуры взаимосвязи элементов системы [9–11]. Поэтому при разработке и принятии управленческих решений необходимо использовать комбинированный подход, который будет учитывать знания и опыт экспертов [6–12], а также привлекать технологии интеллектуальной поддержки принятия решений с применением теории нечетких множеств. Это позволит систематизировать и структурировать имеющуюся информацию, исследовать альтернативные варианты решений и выбрать из них наиболее оптимальные.

Все выше сказанное определяет особые требования к построению самих математических моделей процессов электроснабжения. Процесс разработки управленческого решения в общем виде представляет собой последовательные этапы: анализ проблемы, формулировка целей и задач, выбор критериев и оценка их эффективности, формирование множества альтернативных вариантов при принятии решений, оценка эффективности выбранного решения, формирование управляющего воздействия (окончательный выбор решения) [11–13]. Каждый этап включает в себя ряд задач, решение которых обычно носит параллельный характер. Часть этих задач может решаться на приближенном уровне с помощью экспертной информации [13–15].

В силу вышеперечисленных особенностей энергосистему можно отнести к слабоструктурированным системам. Такая система не дает возможности построить достоверную математическую модель из-за неопределенности взаимодействия элементов системы. Для моделирования системы такого типа хорошо зарекомендовал себя когнитивный подход [2, 3], при котором эффективным инструментом являются нечеткие когнитивные карты (НКК).

Когнитивная карта представляет собой причинно-следственную связь:

$$G = \langle E, W \rangle,$$

где  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – множество факторов, называемых концептами;  $W$  – бинарное отношение на множестве  $E$ , которое задает набор связей между его элементами [3].

Элементы  $e_i$  и  $e_j$  считаются связанными отношением  $W$ , если изменение значения концепта  $e_i$  (причины) приводит к изменению значения концепта  $e_j$  (следствия). При этом говорят, что концепт  $e_i$  оказывает влияние на концепт  $e_j$  (обозначается  $\omega(e_i, e_j)$ ). Если увеличение значения концепта-причины приводит к увеличению значения концепта-следствия, то влияние считается положительным («усиление»), если же значение уменьшается – отрицательным («торможение»). Сами концепты могут задаваться как качественными показателями, так и количественными. Когнитивная карта строится экспертами предметной обла-

сти. В силу этого карта в большей мере отражает субъективный взгляд эксперта на ситуацию, несмотря на то, что некоторые связи могут быть подтверждены статистическими данными. Однако сам процесс её построения и последующий анализ в значительной мере помогают структурировать и наглядно представить накопленные экспертами знания. Такая когнитивная карта называется классической и имеет ограниченное применение в силу того, что не позволяет различать интенсивность взаимовлияния между концептами.

В качестве основы для построения когнитивной карты поступления в сеть электроэнергии энергосистемы наиболее целесообразным представляется использование нечетких когнитивных карт Силова. Понятие нечеткой когнитивной карты Силова представляет собой расширение классического понятия когнитивной карты, основанное на весьма естественном предположении о том, что взаимовлияния между концептами могут различаться по интенсивности и, кроме того, интенсивность любого влияния может изменяться с течением времени. Для учета данного обстоятельства вводится показатель интенсивности влияния, и от «обычного» (классического) отношения мы переходим к нечеткому отношению  $W$ , элементы  $\omega_{i,j}$  которого характеризуют направление и степень интенсивности (вес) влияния между концептами  $e_i$  и  $e_j$ :  $\omega_{i,j} = \omega(e_i, e_j)$ , где  $\omega$  – нормированный показатель интенсивности влияния (характеристическая функция отношения  $W$ ), обладающий следующими свойствами[3]:

- 1)  $-1 \leq \omega_{ij} \leq 1$ ;
- 2)  $\omega_{i,j} = 0$ , если  $e_i$  не зависит от  $e_j$  (влияние отсутствует);
- 3)  $\omega_{i,j} = 1$  при максимальном положительном влиянии  $e_i$  на  $e_i$ , т.е. когда реализация изменений в системе, связанных с концептом  $e_i$ , однозначно определяется действиями изменений, связанных с концептом  $e_i$ ;
- 4)  $\omega_{i,j} = -1$  при максимальном отрицательном влиянии  $e_i$  на  $e_i$ , т.е. когда реализация изменений в системе, связанных с концептом  $e_i$ , однозначно сдерживается действиями, связанных с концептом  $e_i$ ;
- 5)  $\omega_{i,j}$  принимает значения из интервала  $(-1;1)$  при промежуточной степени положительного или отрицательного влияния.

Легко видеть, что нечеткая когнитивная карта отражает весьма наглядное представление о проблеме в виде взвешенного ориентированного графа, вершины которого соответствуют элементам множества  $E$  (концептам), а дуги – ненулевым элементам отношения  $W$  (причинно-следственным связям). Каждая дуга имеет вес, задаваемый соответствующим значением  $\omega_{i,j}$ . Само отношение  $W$  представимо в виде матрицы размерности  $n \times n$  (где  $n$  – число концептов в системе), которая может рассматриваться как матрица смежности данного графа и называется когнитивной матрицей.

После формирования когнитивной матрицы взаимовлияний концептов друг на друга исследуется поведение и устойчивость построенной карты. Рассчитываются системные показатели нечеткой карты – консонансы и диссонансы влияния концептов друг на друга, вычисление которых основано на сравнении контуров, образованных из концептов карты по критерию соответствия, баланса и силы влияния. Российскими исследователями разработан и описан новый

вид когнитивных карт – обобщенные нечеткие когнитивные карты [5]. Они представляют собой нечеткую причинно-следственную сеть вида  $G = \langle E, W \rangle$ , где  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – множество концептов,  $W = \{\omega(e_i, e_j)\}$  – множества связей между ними. Каждый концепт  $e_i, i=1, \dots, P$  характеризуется термом-множеством лингвистической переменной  $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_j}^i\}$ , где  $m_j$  – число типовых состояний концепта. Для описания каждого термина  $T_k^i$  строится терм-множество с функцией принадлежности  $\mu_{T_k^i}(x)$ . Связи между типовыми состояниями каждой пары концептов задаются нечеткими переменными, описываемыми соответствующими нечеткими множествами.

Предлагается один из подходов к построению обобщенной нечеткой когнитивной карты, в которой выделяются входные и выходные переменные, а связи описываются нечеткими правилами. Во множестве концептов  $S$  нечеткой причинно-следственной сети  $G = \langle C, W \rangle$  выделяют множество входных воздействий  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , множество выходных воздействий  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  и промежуточные концепты  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ .  $W = \{\omega(c_i, c_j)\}$  – множество связей между концептами,  $w \in [0;1]$ . Эти связи выражают степень взаимовлияния одного концепта на другой и могут принимать только положительные значения. В простом случае можно ограничиться бинарными связями:  $\omega(c_i, c_j) = 1$  – связь существует,  $\omega(c_i, c_j) = 0$  при ее отсутствии. Каждой такой связи  $\omega(c_i, c_j)$  ставится в соответствие нечеткое правило  $r(c_i, c_j)$  с терминами  $T_i$  и  $T_j$  согласно выражению  $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_j}^i\}$ . Каждому правилу соответствуют функции принадлежности условия и следствия.

Правила, содержащие одинаковые следствия и относящиеся к одному и тому же взаимодействию, объединяются в одно с помощью логического суммирования. Количественный результат взаимодействия между элементами определяется на основе нечеткого вывода. Для определенности дальнейших рассуждений выберем в качестве механизма нечеткого вывода способ Мамдами, а для приведения к четкости воспользуемся центроидным методом [5]. Представим нечеткое правило в виде  $A \Rightarrow B$ , которое в общем случае записывается как

$$\text{ЕСЛИ } (x_1 \in A_1) \text{ И } \dots \text{ И } (x_j \in A_j) \text{ И } \dots \text{ И } (x_n \in A_n) \text{ ТО } (y \in B_j).$$

Для определения результирующего уровня активации применяется оператор логического умножения для отдельных составляющих условия в правиле:

$$\mu_A^j(x) = \min_i (\mu_{A_i}(x_i)).$$

Агрегированная по всем правилам функция принадлежности определяется логическим суммированием:

$$\mu_B(y) = \max_{j=1, N} (\mu_A^j(x) \mu_B^j(y)),$$

а точечная оценка результата концепта вычисляется относительно центра области:

$$y_c = \frac{\int \mu_B(y) y dy}{\int \mu_B(y) dy}.$$

При наличии матрицы взаимовлияний концептов с нечеткими числами друг на друга формула  $\mu_B(y) = \max_{j=1, N} (\mu_A^j(x) \mu_B^j(y))$  примет вид:

$$\mu_B^j(y) = \max_{j=1, N} (\mu_A^j(x \cdot \omega(c_i, c_j)) \mu_B^j(y)).$$

Функционирование такой обобщенной НКК в направлении от входа к выходу определяется зависимостью  $Y = F(X, W)$ , где  $X$  – входные воздействия моделируемой системы, включая и внешние факторы. При наличии обратной связи в системе функциональная зависимость принимает рекуррентный вид:

$$Y(t) = F[X(t-1), Y(t-1), W],$$

где  $t$  – период развития системы.

Построенная нечеткая когнитивная карта, функционирующая по данному алгоритму, позволяет исследовать поведение системы при варьировании величин компонент вектора  $X$  и матрицы связей  $W$ .

Рассмотрим применение изложенного подхода к моделированию поступления в сеть энергосистемы электроэнергии. Как известно, энергосистема – это слабоструктурированная сложная система, опишем ее с помощью параметров  $\langle D(t), S(t), E(t), t \rangle$ , где  $D$  – действия Региональной энергетической комиссии (РЭК);  $S$  – факторы внешней среды;  $E$  – множество концептов, связывающие входные и выходные переменные;  $t$  – время. Ставится задача оптимального управления данной системой и исследования ее поведения во времени при различных воздействиях и условиях внешней среды с последующим применением для составления прогноза поступления в сеть.

Выделим концепты:

1. Поступление в сеть электроэнергии (потребление региона).
2. Полезный отпуск электроэнергии.
3. Условно-постоянные потери (потери холостого хода, потери на корону и др.).
4. Нагрузочные потери.
5. Загрузка имеющегося оборудования электрических сетей.

Построенная нечеткая когнитивная карта моделирует поведение энерго-снабжающего предприятия в регионе в части прогнозирования потребления электроэнергии в регионе, охватывает его основные действующие элементы:

действия региональной энергетической комиссии (концепты: установление тарифа на электроэнергию, утверждение прогнозного баланса);

факторы, определяющие деятельность энергоснабжающего предприятия (строительство новых сетей, техническое перевооружение, ремонт электрических сетей);

характеристики, определяемые деятельностью энергоснабжающего предприятия, – объем переданной электроэнергии;

внешние факторы – погодные условия, праздничные и выходные дни.

#### Библиографический список

1. Гришко А.К., Юрков Н.К., Кочегаров И.И. Методология управления качеством сложных систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – Пенза, 2014. – Т. 2. – С. 377–379.

2. Системный анализ параметров и показателей качества многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств / А.К. Гришко, Н.К. Юрков, Д.В. Артамонов, В.А. Канайкин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 77–84.

3. Гришко А.К., Зюзина А.А. Динамическое управление графическими моделями системы с многими степенями свободы // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2015. – Т. 1. – С. 112–115.

4. Гришко А.К., Юрков Н.К., Жашкова Т.В. Динамическая оптимизация управления структурными элементами сложных систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза, 2015. – № 4 (26). – С. 134-141.

5. Гришко А.К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза, 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.

6. Зудов А.Б., Гришко А.К. Интерфейсы на естественном языке как связь нейронных сетей с экспертными системами // В мире научных открытий. – Красноярск, 2010. – №5–1. – С. 119–122.

7. Гришко А.К. Адаптивная фильтрация в задачах синтеза оптимальных систем принятия решений и управления // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: 2009. – Т. 1. – С. 221–222.

8. Гришко А.К., Горячев Н.В., Юрков Н.К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – URL: <http://ivdon.ru/ru/maga-zine/archive/n2y2015/2885>

9. Гришко А.К. Анализ и оптимизация траектории поведения системы на основе прогнозирующего управления // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2008. – Т. 1. – С. 291–292.

10. Гришко А.К. Алгоритм управления в сложных технических системах с учетом ограничений // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2014. – Т. 2. – С. 379–381.

11. Гришко А.К., Баннов В.Я. Метод последовательного анализа моделей радиолокационных систем в процессе эксперимента // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2013. – Т. 1. – С. 178–179

12. Гришко А.К. Метод оценки качества информации по принятию управляющих решений в интегрированных системах освещения обстановки // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2011. – Т. 2. – С. 331–333.

13. Гришко А.К., Кочегаров И.И., Танатов М.К. Синтез оптимальной структуры сети распределенной системы разнотипных радиоэлектронных средств // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы XII международной научно-практической конференции. – М.: НИИ ВШЭ, 2015. – С. 299–301.

14. Yurkov N.K., Buharov A.E., Goryachev N.V. Features reception and processing of radio thermal signals. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

15. Grishko A.K., Yurkov N.K. Adaptive control of functional elements of complex radio electronic systems. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

**Гришко Алексей Константинович**  
Пензенский государственный  
университет, г. Пенза, Россия  
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

**Grishko A.K.**  
Penza State University,  
Penza, Russia