

На правах рукописи

ТУЛИКОВ
Александр Николаевич

**Управление режимами реактивной мощности и
напряжения систем электроснабжения предприятий
методами искусственного интеллекта**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2007

Работа выполнена в Политехническом институте
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Пантелеев Василий Иванович
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Цугленок Галина Ивановна
- кандидат технических наук, доцент
Плотников Сергей Михайлович
- Ведущая организация: Новосибирский государственный технический
университет (г. Новосибирск)

Защита состоится 14 ноября 2007 года в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Д 501

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат кандидатской диссертации размещен на официальном сайте Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (<http://www.sfu-kras.ru/science/dissertations>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.099.07

Факс: (3912) 43-06-92 (Для кафедры ТЭС)

E-mail: boiko@krgtu.ru

Автореферат разослан 12 октября 2007 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Бойко Е. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прикладные исследования последних лет показали, что обычные методы анализа систем и моделирования на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ), основанные на точной обработке численных данных, по существу не способны охватить огромную сложность реальных технологических процессов, которые определяют, в частности, режимы систем электроснабжения (СЭС). В свою очередь, режимы СЭС определяют и величину потерь в распределительных сетях, и производительность оборудования. Поэтому становится всё более очевидным появление определенных классов задач управления, связанных с принятием решений оператором в контуре «человек – ЭВМ», осуществление диалога в котором происходит посредством применения лингвистических переменных.

В качестве методологической основы для решения подобных задач используется все более популярные в настоящее время искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, теория нечетких множеств и нечеткая логика в совокупности с ситуационным управлением. Под ситуационным управлением понимается управление, основанное на выявлении проблемных ситуаций и преобразовании имеющейся информации в управленческие решения, приводящие к их разрешению. Достоинства нечеткой логики, которые в наибольшей мере проявляются в нечетком управлении, заключаются, прежде всего, в том, что нечеткая логика позволяет удачно представить мышление человека, а именно способы принятия решений человеком, и способы моделирования сложных объектов средствами естественного языка. Нейронные сети, в свою очередь, широко используются для настройки параметров системы нечеткого логического вывода, а генетические алгоритмы – для оптимизации целевой функции.

Совокупность теории нечетких множеств и нечеткой логики образует систему алгоритмов нечеткого управления, реализация которых применительно к ситуационному управлению требует организации периодического измерения исследуемых параметров в реальном масштабе времени. Эту возможность предоставляют автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) либо другие совокупности датчиков для измерения электрических параметров, действующие на промышленных предприятиях. В этой связи представляется актуальным управление режимами СЭС методами искусственного интеллекта в темпе потребления электроэнергии (ЭЭ).

Техническая задача. Экономия электрической энергии и повышение ее качества является одной из важнейших составляющих увеличения эффективности современного производства и развития социальной сферы. Поэтому весьма важной задачей для экономики является совершенствование управления режимами СЭС (в частности, управления режимами реактивной мощности и напряжения) в реальном масштабе времени с помощью таких электроустановок, как трансформаторы главных понизительных подстанций (ГПП) с регулированием под нагрузкой (РПН) и высоковольтные синхронные

двигатели (СД), минимизация потерь активной ЭЭ и мощности, повышение качества напряжения на зажимах электроприемников (ЭП).

Научная задача. Для решения данной технической задачи необходимо создать соответствующую ситуационную модель управления режимами реактивной мощности и напряжения СЭС промышленного предприятия, для разработки которой целесообразно использовать методы искусственного интеллекта. Работа такой модели должна быть настроена таким образом, чтобы на ее основе некоторое логическое устройство, воздействуя одновременно на исполнительные механизмы трансформаторов с РПН и СД, обеспечивало выполнение ряда основных условий:

а) напряжения в узлах нагрузки СЭС должны находиться в нормируемом диапазоне;

б) реактивная мощность в точке раздела с внешней энергосистемой должна быть полностью скомпенсирована;

в) потери ЭЭ в распределительной сети предприятия должны быть сведены к минимуму при соблюдении первых двух условий.

Объект исследований – системы электроснабжения промышленных предприятий с большой установленной мощностью СД и наличием трансформаторов с РПН.

Предмет исследований – ситуационное управление режимами реактивной мощности и напряжения СЭС промышленного предприятия в совокупности с методами искусственного интеллекта.

Цель исследований – разработка методик идентификации, оптимизации, классификации и распознавания состояний для эффективного управления в реальном масштабе времени режимами реактивной мощности и напряжения СЭС в узлах нагрузки с помощью методов искусственного интеллекта.

Задачи исследований:

- 1) обосновать математический аппарат, адекватный задачам исследования управления режимами реактивной мощности и напряжения СЭС;
- 2) разработать методику распознавания состояний СЭС, дополняемую идентификацией состояний СЭС с применением нейро-нечеткой сети и оптимизацией состояний СЭС на основе генетического алгоритма.
- 3) разработать методику классификации состояний СЭС с помощью субтрактивной и нечеткой кластеризации;
- 4) выполнить численный эксперимент в программной среде на основе математической модели, адекватной реальному объекту.

Основная идея диссертации заключается в реализации ситуационного управления, основанной на методах искусственного интеллекта для управления режимами реактивной мощности и напряжения СЭС промышленного предприятия в темпе потребления ЭЭ.

Методы исследований. В настоящей работе использованы методы теории нечетких множеств и нечеткой логики, методы ситуационного управления, теории нейронных сетей и генетических алгоритмов, математического моделирования, теории вычислительного эксперимента,

теории принятия решения, методы кластерного анализа, программные и языковые средства современных компьютерных технологий.

Основные тезисы, выносимые на защиту:

- 1) разработанная методика распознавания состояний СЭС, дополняемая нейро-нечеткой идентификацией и генетической оптимизацией состояний СЭС позволяет решить вопрос о принадлежности текущего состояния к некоторому классу, улучшает качество идентификации какого-либо состояния вследствие уменьшения среднеквадратической ошибки, повышает скорость процесса оптимизации целевой функции суммарных потерь активной мощности по СЭС за счет одновременного использования множества точек поискового пространства без последовательного перехода от точки к точке.
- 2) разработанная методика классификации состояний СЭС, основанная на методах нечеткого кластерного анализа, относит к одному классу состояния, которые имеют наибольшую степень принадлежности к нему.

Научная новизна:

1) сформулированы и реализованы алгоритмически принципы распознавания, идентификации, оптимизации и классификации состояний для решения задачи оптимального управления режимами реактивной мощности и напряжения СЭС на основе методов искусственного интеллекта;

2) разработана методика оптимального управления режимом реактивной мощности и напряжения СЭС, заключающаяся в развитии принципа ситуационного управления для такого объекта, как СЭС, и реализуемая с использованием аппаратов теории нечетких множеств и нечеткой логики, генетических алгоритмов и гибридных нейронных сетей, отличающихся от традиционных методов своей высокой эффективностью.

Значение для теории. Материалы диссертационных исследований включены в учебные программы дисциплин «Математические задачи в электроэнергетике», «Оптимизация электроснабжения промышленных предприятий» специальности 140211.65 – «Электроснабжение» и используются в учебном процессе на кафедре электроснабжения и электрического транспорта Политехнического института Сибирского федерального университета.

Значение для практики заключается, во-первых, в создании методики распознавания состояний систем электроснабжения, дополняемой идентификацией состояний с применением нейро-нечеткой сети и оптимизацией состояний на основе генетического алгоритма. Во-вторых, значение для практики состоит в разработке методики классификации состояний систем электроснабжения с помощью субтрактивной и нечеткой кластеризации. Это дает возможность повысить точность регулирования параметров систем электроснабжения до требуемых значений и, за счет использования распараллеливания вычислительных процессов, позволяет увеличить скорость расчетов, что важно для осуществления управления режимами систем электроснабжения в реальном масштабе времени.

Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением результатов расчетов, полученных в работе с помощью компьютерного

моделирования с фактическими данными, а также сравнением результатов, полученных различными методами математического моделирования. Результаты не противоречат известным положениям современной теории искусственного интеллекта.

Использование результатов диссертации. Результаты диссертационной работы используются для проектирования предприятий цветной металлургии в рамках Соглашения о сотрудничестве между ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и ОАО «Сибцветмет НИИ Проект».

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, соответствует результатам, представляемым в диссертационной работе. Общая научная идея, направления исследований были разработаны и реализованы при участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2006», Томск, 2006

- IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города», Красноярск, 2005;

- V Региональной научно-практической конференции «Интеллектуальные ресурсы ХТИ – филиала КГТУ – Хакасии – 2005 (наука, техника, образование)», Абакан, 2005;

- семинарах кафедры электроснабжения промышленных предприятий ХТИ - филиала КГТУ;

- семинарах кафедры электроснабжения и электрического транспорта КГТУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, включая 1 в издании по списку ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов с выводами, заключения, четырех приложений и библиографического списка из 108 наименований, включая работы автора. Основной текст, содержащий 143 страницы машинописного текста, иллюстрирован 31 рисунком и 23 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится краткое описание достоинств основных методов искусственного интеллекта, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечаются научная новизна и основные тезисы, выносимые на защиту. Дается краткая аннотация содержания работы по разделам.

В первом разделе приводится обзор современного состояния исследований в области оптимизации режимов реактивной мощности и напряжений СЭС, обосновывается перспективность применения методов искусственного интеллекта. Анализ выполненных работ показывает, что

существующие подходы к решению данной задачи, во-первых, сводятся к оптимизации параметров текущего состояния СЭС с последующей их коррекцией в зависимости от величины и характера возмущающих воздействий. Во-вторых, действующая методика оптимального ситуационного управления на основе теории распознавания образов, не обеспечивает достаточной эффективности, скорости и точности расчетов. Показано, что в качестве источника информации целесообразно и экономически выгодно использовать инструмент энергосбережения – автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), уже имеющиеся на многих предприятиях.

Во втором разделе излагается сущность принципа ситуационного управления режимами реактивной мощности и напряжения СЭС, разработаны методики нейро-нечеткой идентификации, генетической оптимизации, классификации на основе нечеткого кластерного анализа и субтрактивной кластеризации и распознавания состояний.

Принцип управления по ситуациям реализуется в виде алгоритма, блок-схема которого приводится на рисунке 1. В блоке 1 производится оценка параметров текущего состояния, заключающаяся в определении численных значений активных, реактивных мощностей, токов и напряжений в контрольных точках СЭС. Затем, в блоке 2 текущее состояние СЭС распознается, т.е. относится к одному из известных классов на основании решающего правила по ряду признаков из рабочего словаря.

Если не удалось отнести текущее состояние к одному из известных классов, необходимо произвести идентификацию (блок 4) и оптимизацию (блок 5) нераспознанного состояния. Затем делается попытка классифицировать неизвестное состояние (блок 6). Если состояние можно классифицировать как принадлежащее одному из известных классов, осуществляется уточнение классификации (блок 9) (к описанию класса добавляется описание текущего состояния), в противном случае (блок 8) классификация пополняется (открывается новый класс состояний).

После этого реализуется план оптимального управления (блок 10), который был получен в результате решения задачи распознавания либо задачи оптимизации.

Для практического осуществления принципа ситуационного управления необходимо получить выборку из множества возможных состояний СЭС и решить задачи идентификации, оптимизации и классификации.

Для идентификации состояний предложено использовать метод двухэтапной идентификации нелинейных зависимостей с помощью нечетких баз знаний. Первый этап – структурная идентификация – представляет собой формирование нечеткой базы знаний, которая грубо отражает взаимосвязь между входами и выходом с помощью лингвистических правил «ЕСЛИ-ТО». На втором этапе проводится параметрическая идентификация исследуемой зависимости путем нахождения таких параметров нечеткой базы знаний, которые минимизируют отклонение модельных и экспериментальных результатов.

Пусть идентифицируемая нелинейная зависимость представлена выборкой данных «входы-выход»:

$$(X_r, Y_r), r = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где $X_r = (x_{r,1}, x_{r,2}, \dots, x_{r,n})$ – вектор входов и Y_r – выход в r -ой паре; M – объем выборки.

Для построения точной зависимости «входы-выход» на имитационной модели проводятся полные факторные эксперименты при варьировании факторов на двух уровнях при числе опытов 2^n .

В качестве факторов (входов) выступают положения регулировочной ступени трансформатора с РПН и относительные значения токов возбуждения 5-ти групп СД (двигатели рассортированы по группам в соответствии с типом и их месторасположением в СЭС), а в качестве откликов (выходов) модели – значения реактивных мощностей и напряжений в L контрольных точках СЭС.

Задача идентификации состоит в нахождении нечетких моделей F для каждого отклика, обеспечивающих минимальное значение среднеквадратической невязки:

$$R = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (Y_r - F(X_r))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $F(X_r)$ – значение выхода нечеткой модели при значении входов, заданных вектором X_r .

При реализации данной методики идентификации используется гибридная нейро-нечеткая сеть (ННС). Ее структура (рисунок 2):

слой 1 – входы объекта идентификации (факторы $X_1 \div X_n$);

слой 2 – нечеткие термы, которые используются в нечеткой базе знаний, описывающей исследуемый объект;

слой 3 – строки-конъюнкции (нечеткие правила) нечеткой базы знаний исследуемого объекта;

слой 4 – классы выходной переменной, объединяющие нечеткие правила;

слой 5 – блок суперпозиции классов выходной переменной, т. е. преобразование результатов нечеткого логического вывода в конкретное четкое число.

В качестве алгоритма нечеткого логического вывода используется алгоритм Сугено, который по сравнению с алгоритмом Мамдани обладает существенными преимуществами:

1) более высокая точность, особенно при больших объемах обучающей выборки, но менее содержательная интерпретация;

2) хорошее сочетание с оптимизационными методами, значительно меньшая ошибка идентификации;

3) обеспечение непрерывности поверхности отклика;

4) гибридность алгоритма, что по своей природе предпочтительнее (правила содержат послылки в виде нечетких множеств и заключения в виде четких линейных функций);

5) более низкая сложность вычислений благодаря отсутствию блока дефаззификации, а отсюда – меньшие требования к вычислительным ресурсам;

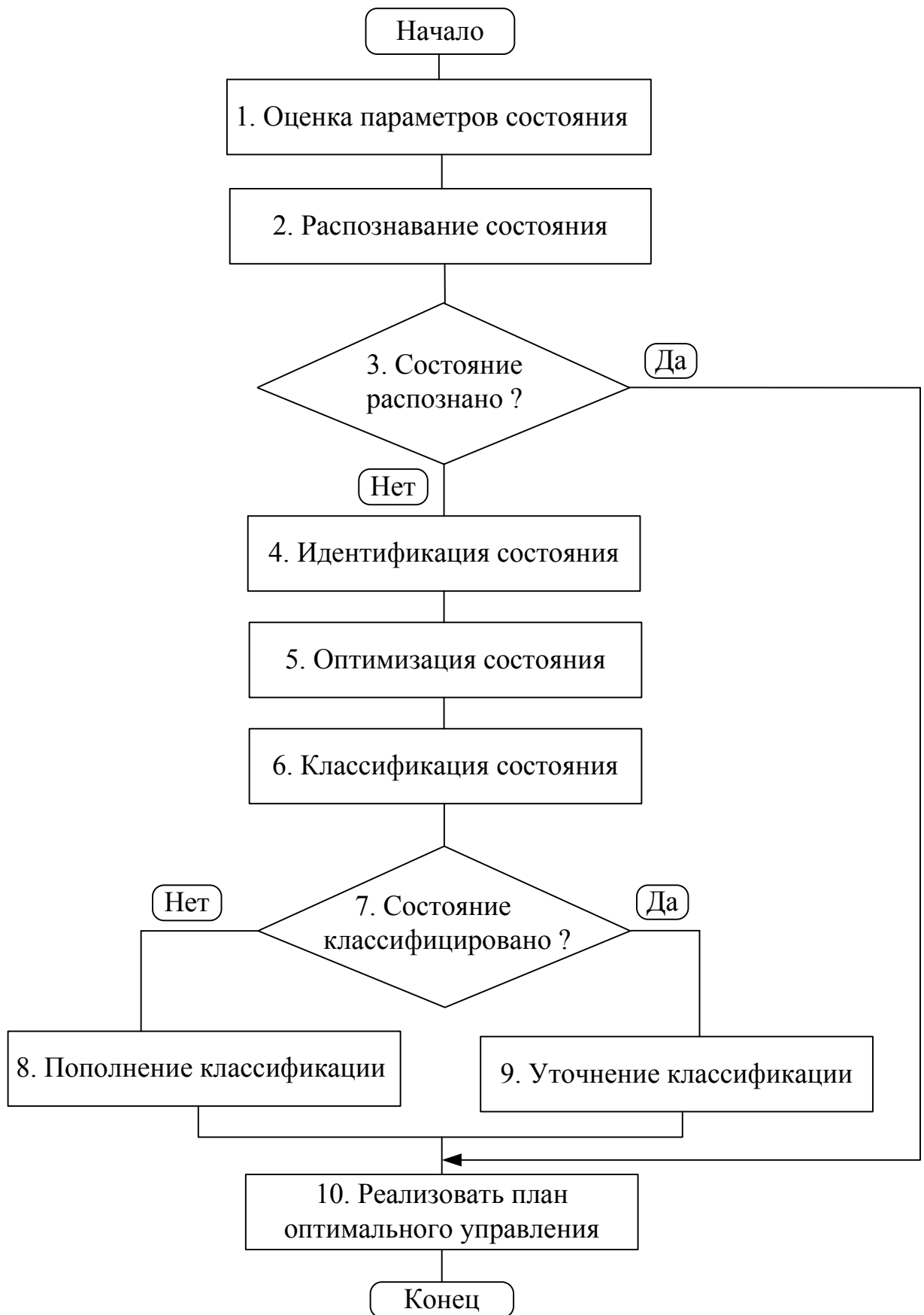


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма ситуационного управления

б) более простая программная реализация;

7) предпочтительность для решения задач в тех случаях, когда известны значения входных переменных и отклик системы на эти значения.

В модели типа Сугено взаимосвязь между входами $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и выходом Y задается нечеткой базой знаний. В качестве функций принадлежности используются функции колоколообразного вида.

В качестве алгоритма обучения ННС используется гибридный алгоритм, объединяющий метод обратного распространения ошибки с методом наименьших квадратов, достоинством которого по сравнению с методом «back-propagation» является быстрая сходимость, что уменьшает вычислительные ресурсы.

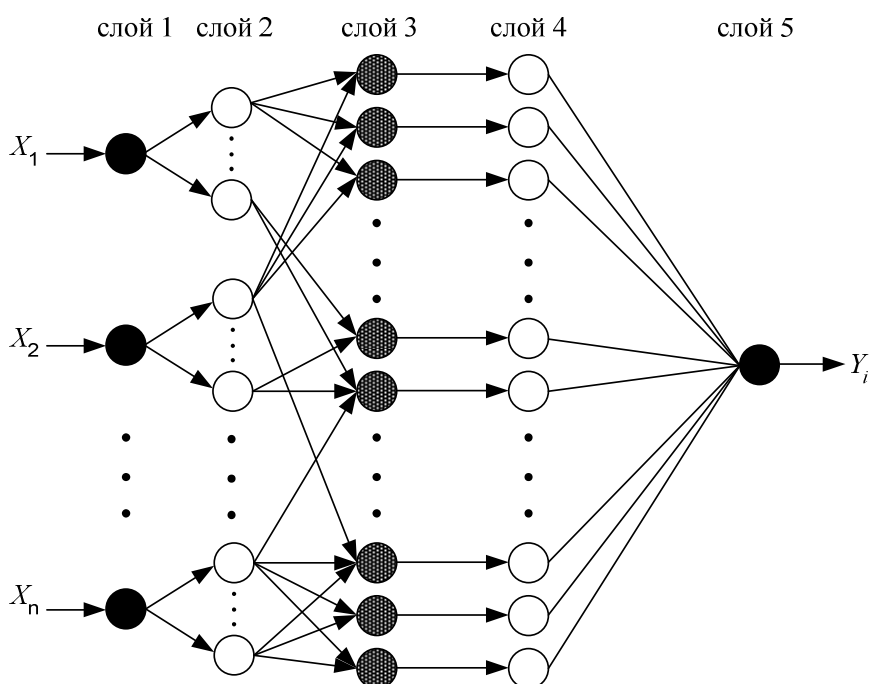


Рисунок 2 – Структурная идентификация зависимости между параметром состояния и управляющими параметрами СЭС

Задача оптимизации состояния СЭС заключается в том, чтобы найти такой вектор управляющих параметров:

$$X_{opt} = (X_1, X_2, \dots, X_n)_{opt} \quad (4)$$

и такой вектор параметров состояния:

$$Y_{opt} = (U_j^{opt}, Q_j^{opt}), \quad j = \overline{1, L}, \quad (5)$$

чтобы показатель качества состояния достигал своего экстремального значения:

$$\Delta P_{\Sigma}(X_1, X_2, \dots, X_n) \rightarrow \min \quad (6)$$

при условии соблюдения ограничений на управляющие параметры:

$$X_1^{\min} \leq X_1^{opt} \leq X_1^{\max}, \quad (7)$$

$$X_i^{\min} \leq X_i^{opt} \leq X_i^{\max}, \quad i = \overline{N_{CD} + 1} \quad (8)$$

и параметры состояния:

$$U_j^{\min} \leq U_j^{opt} \leq U_j^{\max}, \quad (9)$$

$$Q_0 = 0, \quad (10)$$

где $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{CD} + \Delta P_T + \Delta P_{CBЭ}$ – суммарные потери активной мощности: ΔP_{CD} – в СД, ΔP_T – в трансформаторе с РПН, $\Delta P_{CBЭ}$ – в элементах системы внутреннего электроснабжения (шинопроводах, реакторах и пр.);

X_1^{opt}, X_i^{opt} – оптимальные значения положения регулировочной ступени трансформатора с РПН и тока возбуждения i -ой группы СД, N_{CD} – номер группы СД;

U_j^{opt}, Q_j^{opt} – значения напряжений и реактивных мощностей в контрольных точках СЭС, соответствующие X_{opt} при заданном числе факторов n ;

$X_1^{min}, X_1^{max}, X_i^{min}, X_i^{max}$ – нижние и верхние предельно допустимые положения регулировочной ступени трансформатора с РПН и значения токов возбуждения СД i -ой группы;

Q_0 – значение реактивной мощности в точке раздела с внешней энергосистемой.

В качестве алгоритма оптимизации используется простой генетический алгоритм (рисунок 3). Достоинствами такого подхода, по сравнению с традиционными методами оптимизации, являются:

- а) возможность определения глобального экстремума;
- б) способность учитывать любые виды ограничений;
- в) простая структура алгоритма и его программная реализация;
- г) не требуется задание стартовой точки для начала процесса оптимизации, т. е. нечувствительность к начальному приближению;
- д) высокая эффективность применения к комбинаторным и мультимодальным типам задач.

Для решения задачи классификации целесообразно использовать кластерный анализ, под которым понимается совокупность методов, подходов и процедур, разработанных для решения проблемы формирования однородных классов в произвольной предметной области. При этом исходным допущением для выделения таких подмножеств, получивших специальное название кластеров (таксонов или классов), служит лишь неформальное предположение о том, что объекты, относимые к одному кластеру, должны иметь большее сходство между собой, чем с объектами из других кластеров.

Исследуемая совокупность данных представляет собой конечное множество элементов (множество объектов кластеризации – состояний СЭС):

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (11)$$

а конечное множество их признаков или атрибутов:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_q\}, \quad j = \overline{1, q}. \quad (12)$$

В качестве признаков используются положение регулировочной ступени трансформатора с РПН и относительные значения токов возбуждения выделенных групп СД.

Предполагается, что для каждого из объектов кластеризации измерены все признаки множества P . Тем самым каждому из элементов $a_i \in A$ поставлен в соответствие вектор

$$x_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_q^i), \quad (13)$$

где x_j^i – количественное значение признака $p_j \in P$ для объекта данных $a_i \in A$.



Рисунок 3 – Упрощенная блок схема генетического алгоритма

Векторы (13) удобно представить в виде матрицы данных D размерности $(n \times q)$, каждая строка которой равна значению вектора x_i :

$$D = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_q^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_q^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^n & x_2^n & \dots & x_q^n \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Задачу нечеткого кластерного анализа сформулируем следующим образом: на основе исходных данных (14) определить такое нечеткое разбиение или нечеткое покрытие множества $A = \bar{A}$ на заданное число c нечетких кластеров $A_k, k \in \{2, \dots, c\}$, которое доставляет экстремум некоторой целевой функции $f(\mathfrak{R}(A))$ среди всех нечетких разбиений или экстремум целевой функции $f(\mathfrak{S}(A))$ среди всех нечетких покрытий:

$$f(A_k, v_j^k) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^c (\mu_{A_k}(a_i))^m \sum_{j=1}^q (x_j^i - v_j^k)^2, \quad (15)$$

где m – экспоненциальный вес нечеткой кластеризации ($m \in \mathbb{R}, m > 1$); v_j^k – координаты центров нечетких кластеров; $\sum_{k=1}^c \mu_{A_k}(a_i)$ – нечеткое покрытие исходного множества объектов кластеризации $A = \bar{A}$.

В качестве алгоритма решения задачи нечеткой кластеризации используется метод нечетких c -средних, а в качестве алгоритма решения задачи определения числа кластеров c – методом субтрактивной кластеризации.

Распознавание состояния СЭС заключается в определении принадлежности/непринадлежности текущего состояния к одному из известных классов согласно априорной классификации на основании измерений параметров состояния и управляющих параметров.

В качестве признаков распознавания используются параметры состояния – значения реактивных мощностей и напряжений в контрольных точках СЭС. Описание классов на базе словаря признаков представляет собой совокупность вектора параметров функций принадлежности термов входных переменных, вектора коэффициентов линейных функций в заключениях нечетких правил и структуры математической модели (рисунок 2), полученной в результате решения задачи идентификации состояний.

Решение о принадлежности текущего состояния s классу $C = \overline{1, c}$ принимается на основании некоторой меры близости. В качестве такой меры (показателя распознавания) используется сумма некоторых максимальных значений треугольных функций принадлежности. Для перевода каждого признака распознавания в относительный вид отклонения крайних (правого и левого) параметров функции принадлежности приняты равными 25% для наилучшей наглядности (рисунок 4). Здесь L – количество контрольных точек СЭС.

Далее производится анализ полученных (отображенных на относительную шкалу) значений и состояние распознается верно, если каждая

степень истинности (относительное значение) не ниже определенного порога t , а также сумма степеней истинности параметров каждого сравниваемого состояния будет иметь максимальную величину:

$$\sum_{i=1}^L \mu_{y_i}(z) \rightarrow \max; \quad (16)$$

$$\mu_{y_i}(z) \geq t, \quad t \in [0,1].$$

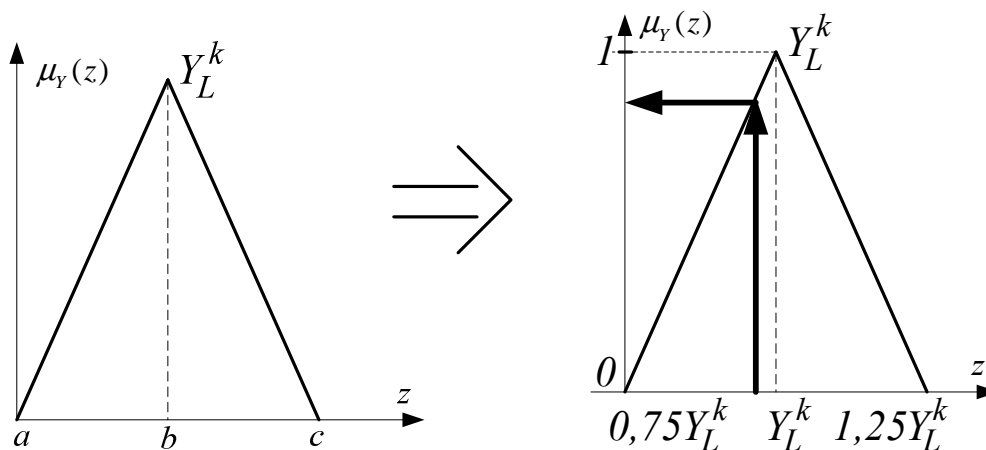


Рисунок 4 – График функции принадлежности треугольной формы

Методика распознавания состояния, наглядно представляющая процесс распознавания с использованием ННС, дает возможность эффективно сопоставить текущее состояние с имеющейся базой данных и в случае успешного распознавания применить план оптимального управления системой.

В третьем разделе производится численный эксперимент на основе имитационной модели, адекватной реальному объекту. В качестве объекта экспериментальных исследований выбрана часть электрической системы Ачинского глиноземного комбината (АГК). На имитационной модели исследована выборка из 30 состояний СЭС, характеризующихся различными оперативными схемами электроснабжения, составом и загрузкой СД.

Для идентификации состояний применяется методика нейро-нечеткой идентификации. Каждая входная переменная $X_1 \div X_6$ (при приведении их от четких значений к нечетким) определяется терм-множеством, состоящее из двух крайних (левого и правого) термов (рисунок 5).

Для выделения достоинств предложенной методики идентификации были построены кривые обучения нечеткой модели типа Сугено и аппроксимирующего полинома 1-го порядка в виде зависимости ошибки идентификации на контрольной выборке от размера обучающей выборки (рисунок 6). Ошибка идентификации рассчитывалась по формуле (2). В качестве исследуемого параметра использовалось напряжение в контрольной точке СЭС №1 в состоянии 27. Из рисунка 6 видно, что ошибка идентификации для нечеткой модели типа Сугено значительно ниже, чем для полиномиальной зависимости.

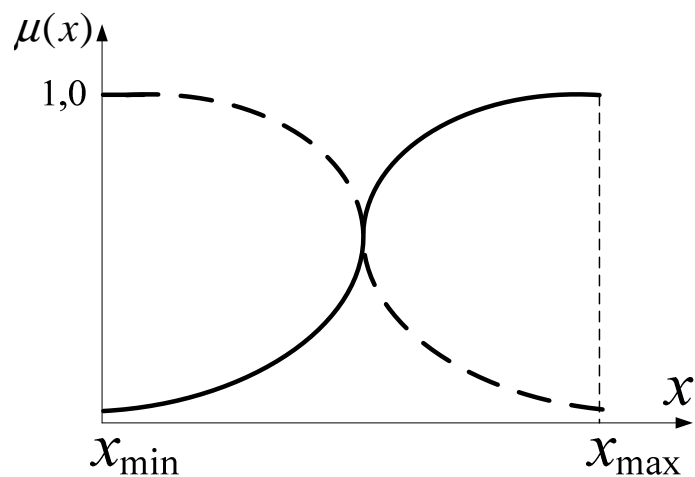


Рисунок 5 – Терм-множество входной переменной

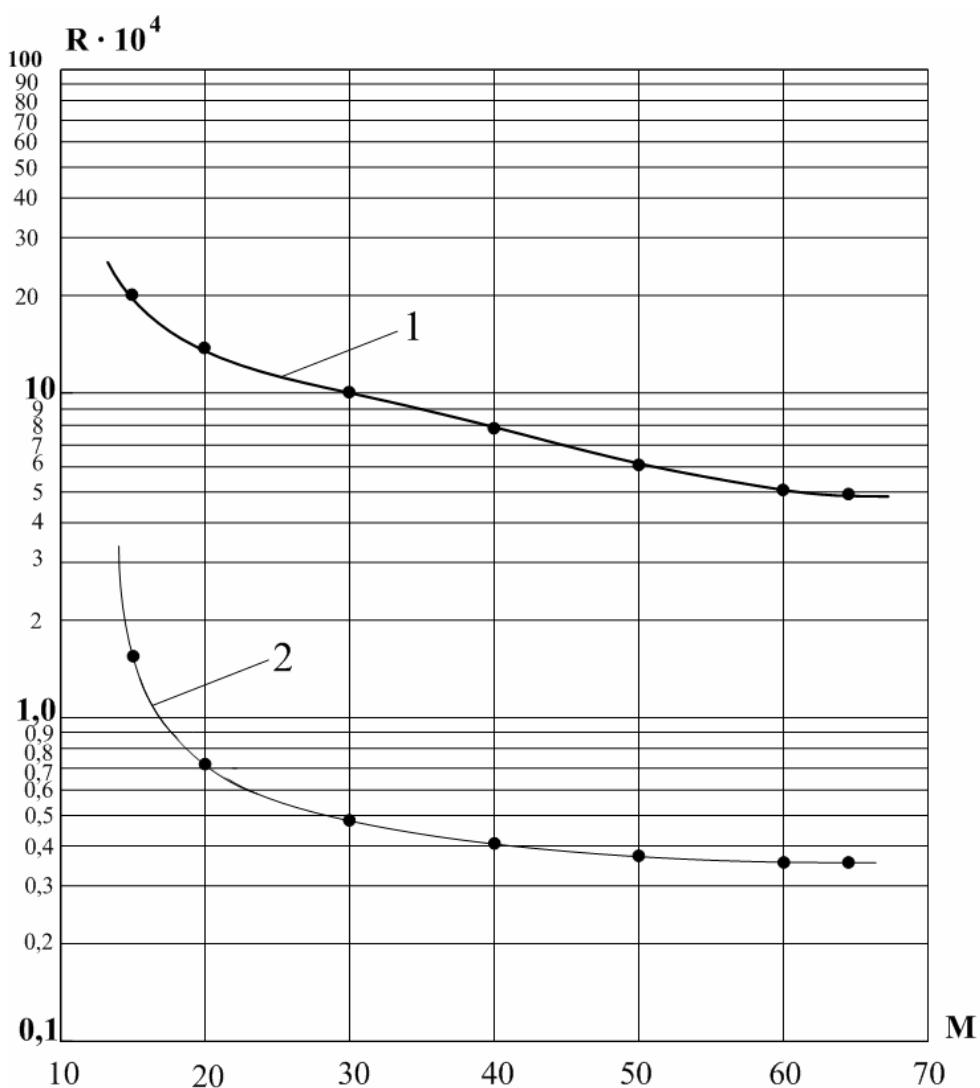


Рисунок 6 – Зависимость ошибки обучения R от объема выборки M:
 1 – аппроксимирующий полином 1-го порядка,
 2 – нейро-нечеткая сеть

В качестве независимых переменных для генетической оптимизации целевой функции (6) выступают факторы $X_1 \div X_6$. На управляющие параметры и параметры состояния накладываются следующие ограничения:

$$5 \leq X_1 \leq 15, \quad 0,95 < U_j < 1,05, \quad j = \overline{1,27}; \quad Q_0 = 0.$$

$$0,5 \leq X_i \leq 1,0 \quad i = \overline{2,6};$$

Преимущество генетических алгоритмов для решения задачи оптимизации по сравнению с методом скользящего допуска (МСД) заключается в следующем. По требуемому времени расчета несомненное преимущество имеет метод нелинейного программирования. Среднее время расчета по 30-ти состояниям по данному методу – 10,74 с против 33,48 с для генетического алгоритма. Однако для генетического подхода время целиком определяется заданной точностью расчета. Кроме того, проведенный сравнительный анализ быстродействия алгоритмов показывает, что с увеличением числа факторов (управляющих параметров), временной ресурс традиционного метода нелинейного программирования возрастает существенно быстрее, нежели для генетического алгоритма (рисунок 7). Как видно, от количества факторов напрямую зависит качество оптимизации состояния.

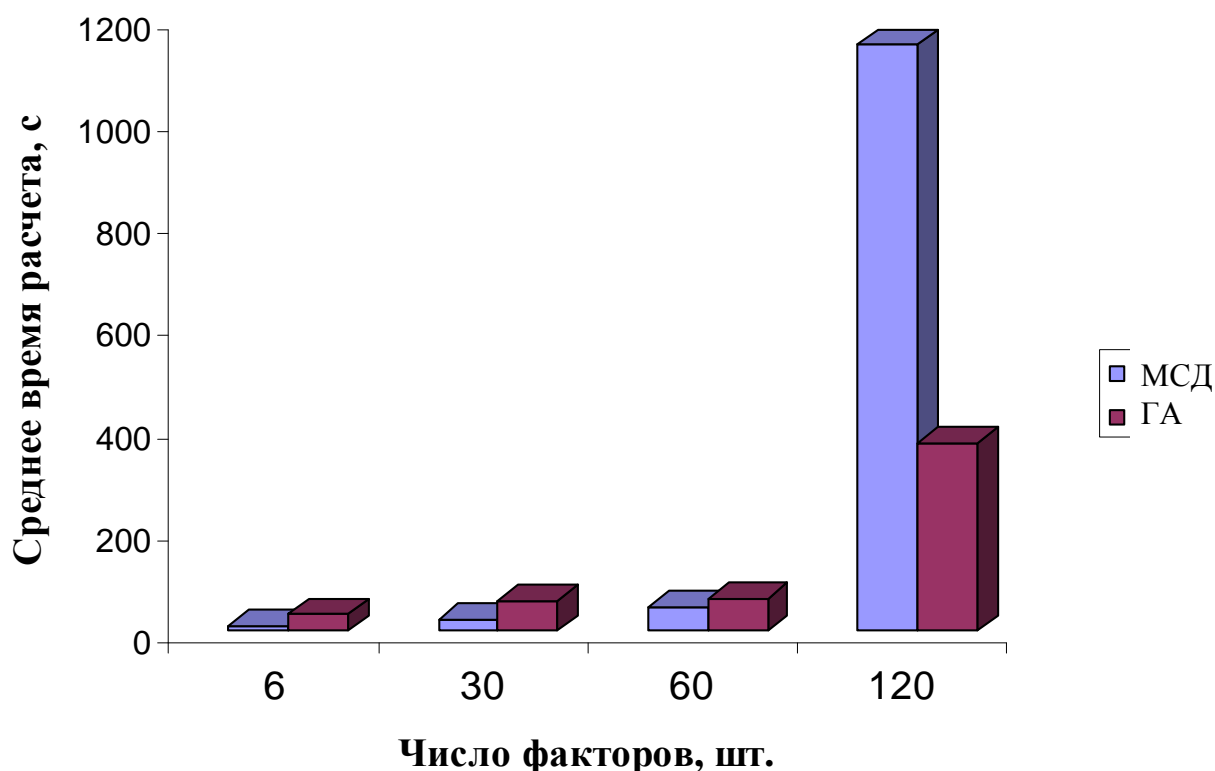


Рисунок 7 – Сравнительный анализ времени расчета

На основании результатов решения задачи оптимизации состояний производим классификацию состояний. Зависимость радиуса окрестности нечеткого кластера от количества состояний объекта приводится на рисунок 8. Центры нечетких кластеров образуют эталоны классов состояний.

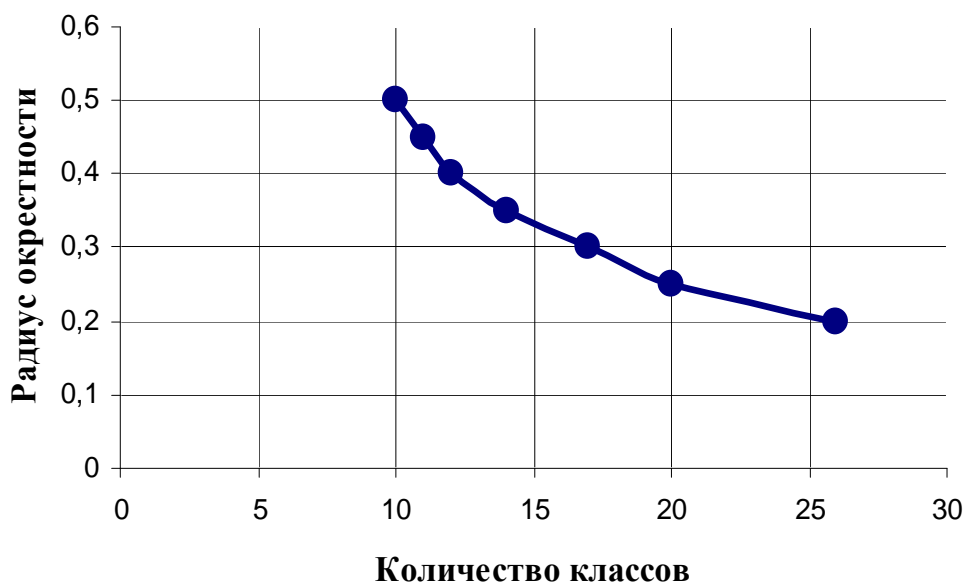


Рисунок 8 – Зависимость радиуса окрестности нечеткого кластера от количества классов (кластеров)

Преимущество предложенной методики классификации по сравнению с методиками на основе традиционных методов (в частности, теории распознавания образов (ТРО)) подтверждает тот факт, что качество разбиения множества состояний на классы, проведенного с помощью методов нечеткого кластерного анализа, существенно выше (наименьшее значение критерия сравнения – 31,728), чем методов ТРО (5353,257). В качестве критерия сравнения выбрана сумма квадратов взвешенных отклонений координат объектов классификации от эталонов (центров) классов состояний:

$$K_C = \sum_{i=1, j=1}^{n, m} (x_{ij} - h_j)^2 \cdot 10^3,$$

где n – количество независимых переменных ($n = 6$); m – количество кластеров (классов) ($m = 11$); x_{ij} – значение независимой переменной с номером i кластера (класса) j ; h_j – координата центра j -го кластера (класса).

Проверка алгоритма распознавания производилась для состояния 27 на основании меры сходства, вычисляемой согласно (16) и показала, что для этого состояния мера сходства принимает максимальное значение 20,72, в то время как для любого другого состояния эта величина не превышает 13,63. Порог распознавания t устанавливается равным 0,4. Результаты проверки позволяют сделать вывод о работоспособности предложенного алгоритма распознавания состояния СЭС.

В четвертом разделе разработан один из возможных вариантов программной реализации идентификации, оптимизации, классификации и распознавания состояний СЭС (на примере АГК) в среде MATLAB с помощью готовых пакетов подпрограмм Fuzzy Logic Toolbox и Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox. Пример зависимости напряжения в контрольной точке №8 в состоянии 27 от двух факторов (положения регулировочной ступени трансформатора с РПН на ГПП и относительного значения токов возбуждения

первой группы СД) представлен на рисунке 9. Сгенерированная структура системы нечеткого вывода типа Сугено изображена на рисунке 10.

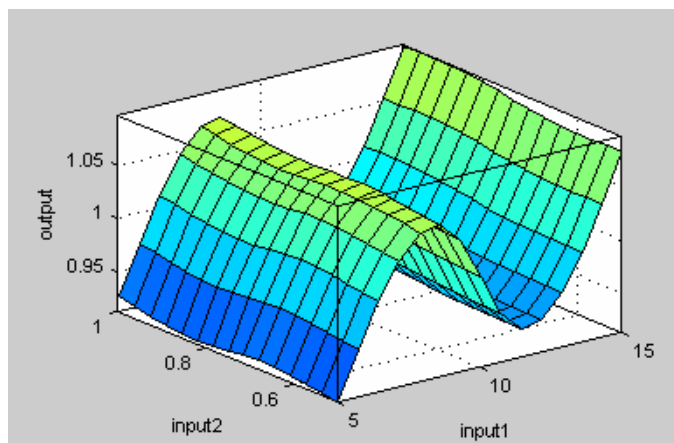


Рисунок 9 – Поверхность системы нечеткого вывода

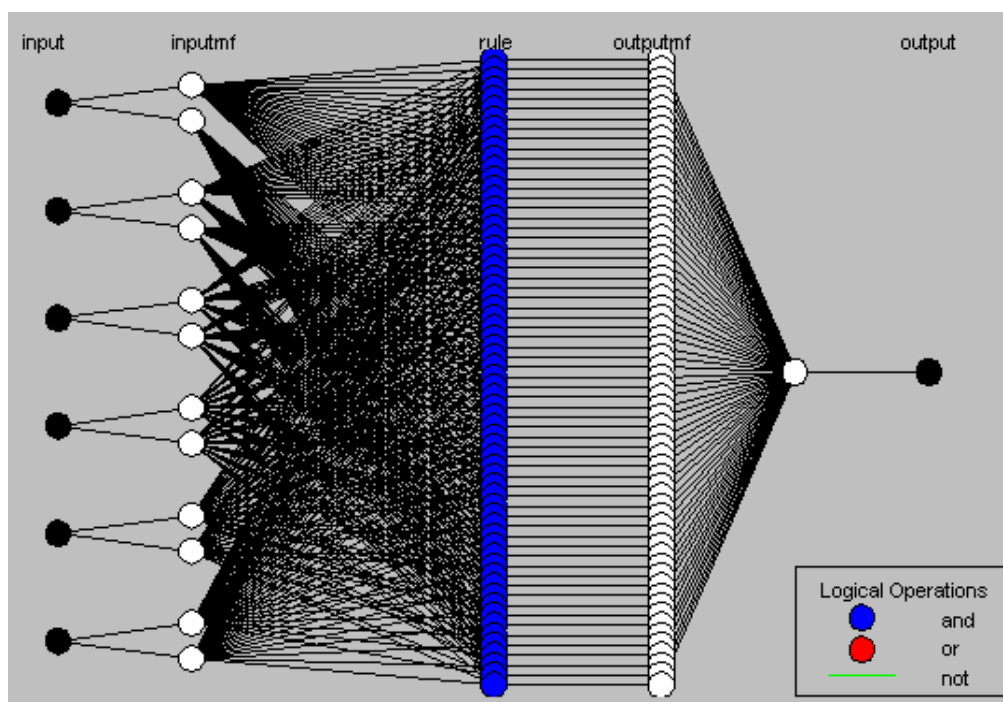


Рисунок 10 – Структура системы нечеткого вывода

Для решения задачи программной реализации разработанных методик идентификации, оптимизации, классификации и распознавания состояний СЭС требуется подготовка данных для системы MATLAB, которые могут быть получены от персонального компьютера, обрабатывающего поступающую информацию от АСКУЭ в темпе потребления ЭЭ.

Предложенная программная реализация разработанных методик идентификации, оптимизации, классификации и распознавания состояний СЭС на основе готовых программных пакетов Fuzzy Logic Toolbox и Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox обладает высокой эффективностью, что позволяет сделать вывод о ее пригодности для решения реальных задач управления режимами реактивной мощности и напряжения СЭС предприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение современных эффективных математических методов в области искусственного интеллекта позволяет радикально изменить существующую методику оптимального управления режимами реактивной мощности и напряжения. Доказано, что для этой цели целесообразно использовать нейρο-нечеткие сети, генетические алгоритмы, нечеткий кластерный анализ и субтрактивную кластеризацию.

2. Разработанная методика идентификации состояний СЭС с применением нейρο-нечеткой сети позволяет с большей точностью по сравнению с регрессионными зависимостями идентифицировать какое-либо состояние вследствие существенного уменьшения среднеквадратической ошибки отклонения модельных результатов от экспериментальных.

3. Методика генетической оптимизации дает возможность с увеличением количества факторов (управляющих параметров) минимизировать время, необходимое для расчета, по сравнению с методами нелинейного программирования, и, наряду с этим, не требует задания стартовой точки, позволяет учитывать любые виды ограничений и найти максимально близкое к оптимуму решение задачи.

4. Предложенная методика нахождения числа кластеров (классов), в которые объединяются по специальным признакам исследуемые состояния СЭС, позволяет найти оптимальное количество классов. Выявлена закономерность между радиусом окрестности нечеткого кластера и количеством классов, которая близка к обратно пропорциональной зависимости. При этом методика классификации состояний СЭС при помощи метода нечетких s -средних по сравнению с методикой на основе ТРО, значительно улучшает качество разбиения множества состояний СЭС на классы, что является фундаментальной задачей управления режимами реактивной мощности и напряжения СЭС предприятий.

5. Методика распознавания состояний, которая сравнивает поступающую на входы системы информацию о текущем состоянии после обработки в ННС и треугольных функциях принадлежности, с информацией, имеющейся в памяти системы управления, использует значение порога распознавания на уровне 0,4 и тем самым улучшает качество распознавания.

6. В целом, разработанная методика оптимального управления режимами реактивной мощности и напряжения, включающая этапы распознавания, идентификации, оптимизации и классификации состояний СЭС повышает точность регулирования параметров СЭС до требуемых значений и, за счет использования распараллеливания вычислительных процессов, позволяет увеличить и скорость расчетов, что важно для осуществления управления системой в реальном масштабе времени.

7. Программный инструмент MATLAB с помощью уже готовых подпрограмм дает возможность воспроизвести каждый этап алгоритма ситуационного управления.

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

1. **Туликов, А. Н.** Математическая постановка задачи управления режимами систем электроснабжения промышленных предприятий / В. И. Пантелеев, **А. Н. Туликов** // Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. Вып. 12 / Под ред. А. А. Михеева, В. А. Кулагина. – Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – С. 136-140.
2. **Туликов, А. Н.** Предпосылки использования нечеткой логики для ситуационного управления режимами систем электроснабжения предприятий / В. И. Пантелеев, **А. Н. Туликов** // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции / Под. ред. В. М. Журавлева, В. А. Кулагина. – Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – С. 192-195.
3. **Туликов, А. Н.** Аппарат нечетких регуляторов в задачах ситуационного управления режимами систем электроснабжения предприятий / В. И. Пантелеев, **А. Н. Туликов** // Интеллектуальные ресурсы ХТИ – филиала КГТУ – Хакасии – 2005 (наука, техника, образование): Сб. тезисов НПК / Под. ред. С. И. Рябихина. – Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – С. 85-87.
4. **Туликов, А. Н.** Возможности нечеткого управления режимами систем электроснабжения промышленных предприятий / В. И. Пантелеев, **А. Н. Туликов** // XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 27-31 марта 2006 г. Труды в 2-х т. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та. – 2006. – Т.2. – С. 183-185.
5. **Туликов, А. Н.** Основы нечеткого управления режимами систем электроснабжения предприятий с помощью АСКУЭ / В. И. Пантелеев, **А. Н. Туликов** // XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 27-31 марта 2006 г. Труды в 2-х т. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та. – 2006. – Т.2. – С. 180-182.
6. **Туликов, А. Н.** Оптимизация состояний систем электроснабжения предприятий с помощью генетических алгоритмов / В. И. Пантелеев, **А. Н. Туликов** // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Часть 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2006. – С. 222-224.
7. **Туликов, А. Н.** Методы искусственного интеллекта в управлении режимами систем электроснабжения предприятий / В. И. Пантелеев, **А. Н. Туликов** // «Доклады ТУСУРа» №2 (16). – 2007. – С. 28-34.

Туликов Александр Николаевич

Управление режимами реактивной мощности и напряжения систем электроснабжения предприятий методами искусственного интеллекта.

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата техн. наук.

Подписано в печать 10.10.2007. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

ИПЦ Политехнического института Сибирского федерального университета