

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Постановка задачи

Традиционные методы построения моделей систем регулирования не приводят к удовлетворительным результатам, когда исходное описание решаемой проблемы заведомо является неточным или неполным. Стремление получить всю исчерпывающую информацию для построения точной математической модели может привести к потере времени и средств, поскольку это может быть в принципе невозможно.

В подобных случаях наиболее целесообразно воспользоваться такими методами, которые специально ориентированы на построение моделей, учитывающих неполно-

ту и неточность исходных данных. Именно в таких ситуациях технология нечеткого моделирования оказывается наиболее конструктивной. В западных странах и странах СНГ ведутся интенсивные исследования в области создания новых типов адаптивных автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) на основе нечеткой логики [5-12].

Для выполнения основных системных функций АРВ (стабилизации напряжения на шинах синхронного генератора (СГ) и демпфирования колебаний ротора в переходных процессах) необходимо изменять величину тока ротора в соответствии с действующим режимом

объекта. Обычные АРВ с постоянными коэффициентами усиления (жесткой настройкой) не могут обеспечить качественное регулирование во всем многообразии режимов работы СГ. Представляется целесообразным конструирование АРВ на основе аппарата нечетких выводов, позволяющего получить регулирующее воздействие, адекватное текущему режиму объекта. Это дает возможность не только повысить качество регулирования, но также расширить область устойчивости регулируемой системы.

Объект исследования и АРВ с жесткой настройкой

Для конструирования и исследования нечеткого АРВ в качестве объекта управления принята простая регулируемая система (СГ с АРВ, работающий на шины бесконечной мощности через внешнее сопротивление X_c), рис.1, часто применяемая для решения задач синтеза АРВ. Моделировался АРВ сильного действия (СД) с жесткой настройкой и фаззи-АРВ с такими же каналами для выполнения сравнительного анализа систем регулирования. Параметры режима объекта в относительных единицах указаны на соответствующих рисунках.

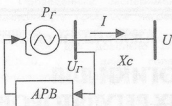


Рис. 1. Простая регулируемая система

Переходные процессы в простой регулируемой системе описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений [1, с.165]:

$$\begin{cases} T_J \cdot p^2 \cdot \delta = P_T - P_{ЭЛ}, \\ E_{qe} = E_q + T_{d0} \cdot p \cdot E'_q, \\ E_{qe} = E_{qe0} + \sum_j W'_{Tj}(p) \Pi_j, \end{cases} \quad (1)$$

где T_J - постоянная инерции СГ, с;
 T_{d0} - постоянная времени обмотки возбуждения СГ, с;

E_q и E'_q - синхронная и переходная ЭДС СГ соответственно;

P_T и $P_{ЭЛ}$ - мощность турбины и электрическая мощность СГ соответственно;

E_{qe} - вынужденная составляющая ЭДС СГ, обусловленная действием АРВ.

Здесь первые два уравнения при $E_{qe} = E_{qe0} = E_{q0}$ описывают переходные процессы в простой нерегулируемой электрической системе, а третье уравнение описывает АРВ в виде передаточных функций:

$$W'_{\Pi_j}(p) = \frac{1}{1 + pT_c} \cdot \frac{1}{1 + pT_p} W_{\Pi_j}(p), \quad (2)$$

где T_c - постоянная времени возбудителя, с;

T_p - постоянная времени регулятора, с;

Π_j - режимный параметр, по которому осуществляется регулирование.

Для АРВ СД (при пренебрежении постоянными времени дифференцирующих звеньев) выражение передаточной функции собственно регулятора со входом Π_j имеет вид:

$$W_{\Pi_j}(p) = K_{\delta\Pi_j} + K_{1\Pi_j} p, \quad (3)$$

где $K_{\delta\Pi_j}, K_{1\Pi_j}$ - коэффициенты усиления АРВ по отклонению и первой производной режимного параметра.

В системе уравнений (1) электрическая мощность СГ $P_{ЭЛ}$, переходная ЭДС E'_q и Π_j являются нелинейными функциями двух переменных: угла нагрузки δ и синхронной ЭДС E_q . Ограничимся введением каналов регулирования по отклонениям напряжения генератора ΔU_r , тока ротора Δi_j и их производным и выполним линеаризацию (1) в некоторой точке рабочего режима. Принимая во внимание, что ток ротора пропорционален синхронной ЭДС, получим систему линеаризованных дифференциальных уравнений простой регулируемой электрической системы, которая при $T_p=0$ запишется в виде:

$$\begin{cases} T_j \cdot p^2 \cdot \Delta\delta + \Delta P = 0, \\ T_{d0} \cdot p \cdot \Delta E'_q + \Delta E_q = \Delta E_{qe}, \\ \Delta E_{qe} = \frac{(K_{ow} + K_{lw} \cdot p) \cdot \Delta U_r + (K_{yf} + K_{lyf} \cdot p) \cdot \Delta E_q}{(1 + p \cdot T_r)}. \end{cases} \quad (4)$$

После несложных преобразований система (4) преобразуется в систему уравнений динамики в матричной форме Коши:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta S} \\ \dot{\Delta E}_{qe} \\ \dot{\Delta E}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_1}{T_j} & 0 & 0 & -\frac{b_1}{T_j} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & a_{42} & \frac{1}{T'_d} & -\frac{1}{T'_d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta S \\ \Delta E_{qe} \\ \Delta E_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_j} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta P_T; \quad (5)$$

$$\Delta U_r = (\partial U_r / \partial \delta) \Delta \delta + (\partial U_r / \partial E_q) \Delta E_q,$$

где $a_{31}, a_{32}, a_{33}, a_{34}$ - элементы матрицы, определяемые структурой АРВ (введенными каналами регулирования);

$$b_1 = \frac{\partial P}{\partial E_q}; \quad c_1 = \frac{\partial P}{\partial \delta}; \quad a_{42} = U \frac{X'_d - X'_q}{X'_d X'_q} \sin \delta;$$

ΔP_T - изменение мощности турбины;

$[\Delta\delta \quad \Delta S \quad \Delta E_{qe} \quad \Delta E_q]^T$ - вектор состояния, составленный из приращений угла нагрузки СГ, скольжения ротора, напряжения возбуждения СГ и синхронной ЭДС.

Системе уравнений (5) соответствует структурная схема АРВ СД, изображенная на рис. 2, подобная приведенной в [1, с. 172], в которой для упрощения решения и анализа представлены только каналы регулирования по отклонениям напряжения статора и тока ротора и их производным.

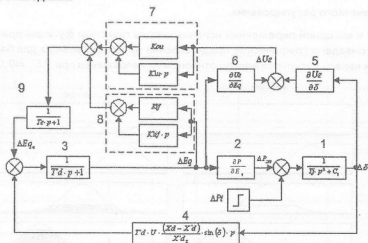


Рис. 2. Структурная схема системы АРВ СД

В структурную схему входят: 1 – колебательное звено, отражающее движение ротора; 2 – усилительное звено; 3 – инерционное звено (физически соответствует прохождению сигнала через цепь с активным и индуктивным сопротивлениями обмотки возбуждения СГ); 4 – звено, которое реализует внутреннюю гибкую отрицательную обратную связь (физически отражает обратные реакции СГ, имеющего замкнутый контур на роторе); 5, 6 – формируют

приращение параметра ΔU_r ; 7, 8 – ПД-регуляторы, осуществляющие регулирование по отклонению и по производной напряжения статора СГ и по отклонению и по производной тока ротора соответственно; 9 – инерционное звено (силовой элемент – возбудитель).

Из структурной схемы видно, что роль АРВ в этой автоматической системе выполняют звенья 7 и 8, а величину ΔE_{qe} , обусловленную действием АРВ, имеем на выходе возбудителя

9. Регулирование по введенным каналам определяется выражением:

$$\Delta \dot{E}_{qe} = \frac{K_{ou}}{T_e} \Delta U_r + \frac{K_{iu}}{T_e} p \Delta U_r - \frac{K_{of}}{T_e} \Delta E_q - \frac{K_{if}}{T_e} p \Delta E_q - \frac{1}{T_e} \cdot \Delta E_{qe}, \quad (6)$$

где изменение ΔE_q пропорционально изменению тока ротора.

Нечеткий АРВ и его исследование

Для регулирования на основе нечеткой логики последнее уравнение перепишем в виде:

$$\Delta \dot{E}_{qe} = \text{fuzzy_}K_{ou} + \text{fuzzy_}K_{iu} - \text{fuzzy_}K_{of} - \text{fuzzy_}K_{if} - \frac{1}{T_e} \cdot \Delta E_{qe}, \quad (7)$$

где $\text{fuzzy_}K_{ou}$, $\text{fuzzy_}K_{iu}$, $\text{fuzzy_}K_{of}$, $\text{fuzzy_}K_{if}$ – воздействия каналов нечеткого регулирования по отклонению напряжения, по производной отклонения напряжения, по отклонению тока ротора и по производной отклонения тока ротора соответственно.

Моделировалось раздельное регулирование по введенным в (7) каналам, что наиболее соответствует существующей структуре АРВ сильного действия, и регулирование с учетом взаимного изменения параметров в каналах каждого из ПД-регуляторов АРВ.

При раздельном нечетком регулировании по каналам использовалась база правил:

Правило_1: Если $\Delta \Pi$ есть Negative, то $\text{fuzzy_}K_x$ есть Negative.

Правило_2: Если $\Delta \Pi$ есть Enegative, то $\text{fuzzy_}K_x$ есть ENegative.

Правило_3: Если $\Delta \Pi$ есть N, то $\text{fuzzy_}K_x$ есть N.

Правило_4: Если $\Delta \Pi$ есть Epositive, то $\text{fuzzy_}K_x$ есть EPositive.

Правило_5: Если $\Delta \Pi$ есть Positive, то $\text{fuzzy_}K_x$ есть Positive,

где $\Delta \Pi$ – параметр, по которому происходит регулирование: ΔU_r , $p \Delta U_r$, ΔE_q , $p \Delta E_q$; $\text{fuzzy_}K_x$ – воздействия, вызванные входными параметрами $\Delta \Pi$ по соответствующим каналам нечеткого регулирования.

Для входных и выходной переменных использовались гауссовы функции принадлежности, рис. 3; там же приведено графическое представление нечеткого вывода для базы правил (8) применительно к каналу регулирования по отклонению напряжения при $\Delta U_r = 0.0354$.

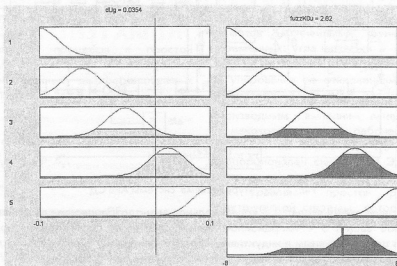


Рис. 3. Представление нечеткого вывода для базы правил (8)

Здесь и далее в правилах логического вывода использован метод логического произведения (по минимальному значению функций принадлежности входных переменных); для решения задачи дефаззификации использован метод определения центра тяжести дискретного множества значений функций принадлежности [2, 3]. Вид и расположение термов входных и выходных переменных в диапазоне их изменения определен по результатам моделирования системы (рис. 2) с жесткой настройкой каналов APB.

Разделение каналов дает возможность наблюдать влияние на качество регулирования и запас устойчивости системы интересующих каналов регулирования, а также выявить влияние на качество решения задачи вида функций принадлежности каждой из входных/выходных переменных и их размещения на оси абсцисс. Можно использовать основной канал регулирования по отклонению напряжения аналогового типа с жесткой настройкой совместно со стабилизирующими нечеткими каналами.

Любой из каналов регулирования на основе нечеткой логики обладает некоторой нелинейностью (в зависимости от вида функций принадлежности и составленной базы правил), что делает возможным для малых отклонений реализовать «мягкое» (малое, среднее) регулирование, а для боль-

ших - сильное демпфирующее воздействие, направленное на быструю сходимость переходного процесса. Кривые переходных процессов, полученные в результате интегрирования уравнений динамики (5) при использовании фаззи-АРВ с правилами (8) для указанного режима объекта, приведены на рис. 4. Наблюдаемые при этом корневые годографы этой системы свидетельствуют о том, что фаззи-коррекция в темпе переходного процесса реализует АРВ с переменной настройкой, направленной на улучшение качества регулирования и сохранение устойчивости системы. Для этого при моделировании системы фаззи-коррекция осуществлялась на каждом шаге интегрирования системы (5). Переходный процесс в тестовой системе с АРВ с жесткой настройкой (настройка указана на рис. 5,а) при том же режиме объекта подобен рис. 4.

При увеличении электрической мощности СГ до значения, приведенного на рис. 6,а, АРВ с той же жесткой настройкой (указана на рисунке) не обеспечивает устойчивое регулирование, в то же время фаззи-АРВ сохраняет устойчивость системы (рис. 5,б), что объясняется изменением настройки каналов в процессе фаззи-коррекции в темпе переходного процесса в сторону увеличения запаса устойчивости и подтверждается соответствующими корневыми годографами.

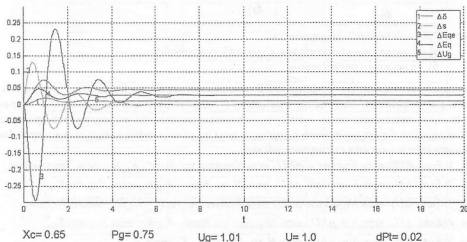
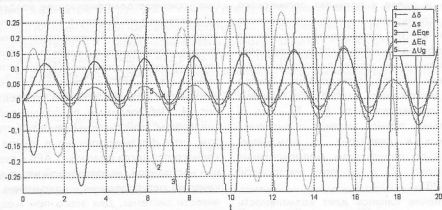
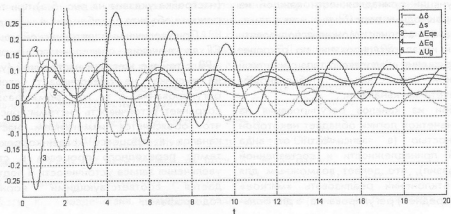


Рис. 4. Графики переходного процесса с нечетким регулятором



$X_c = 0.8$ $P_g = 0.95$ $U_g = 1.01$ $U = 1.0$ $dPt = 0.02$
 $K_{ou} = 40$ $K_{1u} = 8$ $K_{if} = 8$ $K_{1lf} = 5$

а)



$X_c = 0.8$ $P_g = 0.95$ $U_g = 1.01$ $U = 1.0$ $dPt = 0.02$

б)

Рис. 5. Графики переходного процесса:

- а) – с аналоговым регулятором с жесткой настройкой;
- б) – с нечетким регулятором

Качество регулирования с фаззи-АРВ можно улучшить, объединив в единый блок нечеткого регулирования каналы по отклонению параметра и его производной. Уточненная база правил, учитывающая связь между изменением параметра режима и его производной, для совмещенного блока нечеткого регулирования по отклонению напряжения и производной отклонения напряжения имеет следующий вид:

Правило_1: Если ΔU_r есть *Negative* и $p\Delta U_r$ есть *Negative*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *NegativeSum*.

Правило_2: Если ΔU_r есть *Negative* и $p\Delta U_r$ есть *N*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *NegativeK_{ou}*.

Правило_3: Если ΔU_r есть *Negative* и $p\Delta U_r$ есть *Positive*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *EvNegative*.

Правило_4: Если ΔU_r есть *N* и $p\Delta U_r$ есть *Negative*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *NegativeK_{1u}*.

Правило_5: Если ΔU_r есть *N* и $p\Delta U_r$ есть *N*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *N*.

(9)

Правило_6: Если ΔU_r есть *N* и $p\Delta U_r$ есть *Positive*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *PositiveK_{1u}*.

Правило_7: Если ΔU_r есть *Positive* и $p\Delta U_r$ есть *Negative*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *EvPositive*.

Правило_8: Если ΔU_r есть *Positive* и $p\Delta U_r$ есть *N*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *PositiveK_{ou}*.

Правило_9: Если ΔU_r есть *Positive* и $p\Delta U_r$ есть *Positive*, то $fuzzy_K_{ou}K_{1u}$ есть *PositiveSum*.

Вид функций принадлежности переменных представлен на рисунке рис.6, а, б, в.

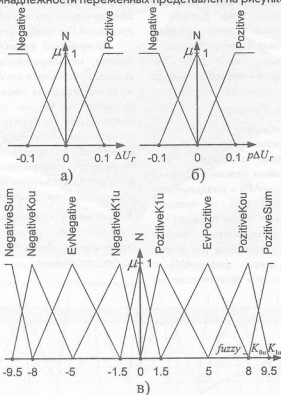


Рис. 6. Вид функций принадлежности для:

- а) – отклонения напряжения ΔU_r ;
- б) – производной отклонения напряжения $p\Delta U_r$;
- в) – выхода нечеткого блока $fuzzy_K_{ou}, K_{iu}$.

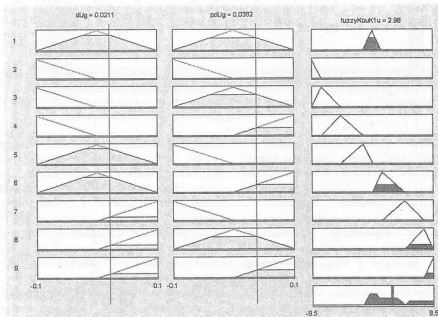


Рис. 7. Графическое представление нечеткого вывода для базы правил (9)

Правила для блока нечеткого регулирования по отклонению тока ротора и производной отклонения тока ротора аналогичны (9); вид функций принадлежности подобен приведенным на рис. 6. Графическая иллюстрация нечеткого вывода для базы правил (9) при $\Delta U_r = 0.0211$ и $p\Delta U_r = 0.0322$ приведена на рис. 7.

На рис. 8, а, б приведены соответственно кривые переходных процессов, полученные при решении уравнений динамики (5) с указанными параметрами режима объекта при использовании фаззи-АРВ с отдельными каналами (база правил (8)) и попарно объединенными каналами (база правил (9)), откуда видно, что объединение фаззи-каналов обеспечивает устойчивое регулирование в ситуации, когда фаззи-АРВ с отдельными каналами его практически не

обеспечивает. АРВ с жесткой настройкой не обеспечивает устойчивость такой системы ни при какой настройке каналов.

Нелинейный характер регулирования на основе используемого аппарата нечетких выводов, близкий к кусочно-линейной зависимости от входных переменных АРВ, иллюстрируют рис. 9, на котором изображена поверхность нечеткого вывода для объединенного канала нечеткого регулирования по отклонению напряжения и по производной напряжения СГ, и рис. 10, где показана зависимость выхода этого канала от входа ΔE_q при отключенном входе $p\Delta E_q$. Аналогичный вид имеют управляющие воздействия для других сочетаний входных переменных объединенных каналов нечеткого регулирования.

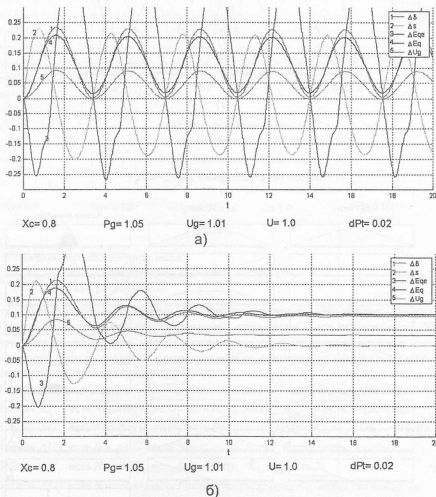


Рис. 8. Графики переходного процесса:
 а) – с отдельными нечеткими блоками АРВ;
 б) – с объединенными нечеткими блоками АРВ

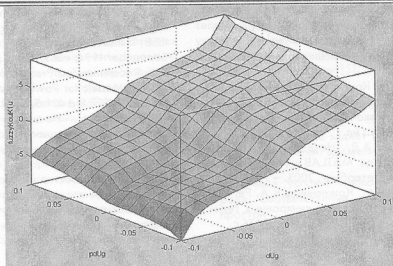


Рис.9. Поверхность нечеткого вывода для совмещенного канала регулирования $K_{0u}K_{1u}$ по отклонению ΔU_r и производной $p\Delta U_r$

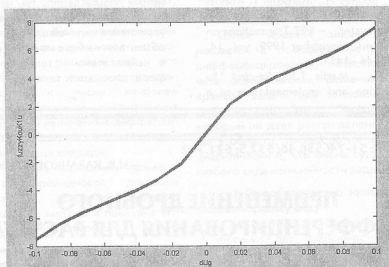


Рис.10. Зависимость выхода нечеткого канала $K_{0u}K_{1u}$ от входа ΔU_r при отключенном входе $p\Delta U_r$

При конструировании нечетких систем принятия решений всегда стоит задача выбора алгоритма логического вывода. Полученные результаты способствуют решению этой задачи в пользу использования механизма нечеткого вывода типа Сугено, где управляющие воздействия моделируются линейными функциями входных переменных АРВ. Настройка таких моделей регулирования, равно как и выбор структуры системы АРВ и набора ее входных переменных составляют предмет отдельного исследования.

Работа выполнена с использованием пакета нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox вычислительной системы MATLAB версии 5.3.1.29215a (R11.1).

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что фаззи-АРВ, обеспечивая адаптивное регулирование, имеет существенные преимущества по сравнению с АРВ с жесткой настройкой, допускает расширение базы правил и использование различных механизмов нечеткого вывода, улучшающие качество регулирования, и имеет хорошие перспективы практического применения.

Литература

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: - М.: Высшая школа, 1978. - 416 с.: ил.
2. Дьяконов В. Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. -СПб: Петербург, 2001. - 480 с.: ил.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. - СПб.: БХВ-Петербург, 2003. - 736 с.: ил.
4. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов.- СПб.: Наука, 1996. - 136 с.
5. Борцов Ю.А., Бурмистров А.А., Логинов А.И. и др. Робастные регуляторы возбуждения мощных синхронных генераторов. - Электричество, 2003, №7. - С. 29 - 35.
6. Quinot H., Bourles H., Margotin T. Robust coordinated AVR+PSS for damping large scale power system. - IEEE Transactions on Power Systems, November 1999, vol. 14, № 4, p.p. 1446 - 1451.
7. Hasan A.,R., Martis T.S., Sandrul Ula A.H.M. Design and implementation of a fuzzy controller based automatic voltage regulator for a synchronous generator. - IEEE Transactions on energy conversion, September 1994, vol.9,№3, p.p. 550 - 556.
8. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. - IEEE Std 421.5, 1992. - 56 p.p.
9. Агамалов О.Н. Нечеткий адаптивный стабилизатор мощности синхронного генератора. - Электричество, 2004, № 9. - С. 24 -33.
10. Беляев А.Н. Проектирование адаптивных автоматических регуляторов возбуждения мощных синхронных генераторов методами нейро-нечеткой идентификации. Автореферат дисс. канд. техн. наук. - СПб, 2000.
11. Jang J.S.R. and Sun C.-T. Neuro-fuzzy modeling and control, The Proceedings of the IEEE. vol. 83, p.p.78-406, Mar. 1995. (<http://neural.cs.nthu.tw/jiang/>).
12. Хо Дак Лок. Синтез адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами на базе нечетких регуляторов и нейросетевой технологии. Автореферат дисс. докт. техн. наук. - М., 2002.