

УДК 681.5

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО НЕЙРОУПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ

В.Н. Сизых

Иркутский государственный университет путей сообщения
Россия, 664074, Иркутск, Чернышевского ул., 15
E-mail: sizykh_vn@mail.ru

С.О. Бухаров

Иркутский государственный университет путей сообщения
Россия, 664074, Иркутск, Чернышевского ул., 15

Р.О. Данеев

Восточно-Сибирский институт МВД России
Россия, 664074, Иркутск, Лермонтова ул., 110

Ключевые слова: технологический модуль, нейронная сеть, адаптивное управление, параметрический синтез, метод скоростного градиента, скользящие режимы.

Аннотация: В докладе предлагается новый подход к совмещенному параметрическому синтезу (синтезу в реальном или в ускоренном времени) нейрорегуляторов многомерных и многосвязных физических систем и технологических процессов на основе применения метода скоростного градиента в дифференциальной форме и теории скользящих режимов.

1. Введение

Адаптивный подход предполагает наличие линейной математической модели, основанной на физических явлениях, и оценку неизвестных параметров, включенных в эту модель. Аналогичную функцию выполняют нейронные сети (НС). Однако, основной недостаток НС, организованных по последовательной схеме, – медленная сходимость алгоритмов адаптации (обучения и управления) в реальном времени – существенно ограничивает практическое применение нейронного управления. Существующие схемы нейронного управления оказываются квазиадаптивными с настройкой вне темпа процессов управления, либо, будучи по сути адаптивными, недостаточно обоснованными из-за сложностей анализа работоспособности, устойчивости, качества и достижения целей управления [1]. Кроме того, классические постановки задач нейроуправления слабо связаны с понятиями многосвязности и многомерности реальных физических систем, алгоритмы управления сводятся либо к реализации программного управления с эмпирическим выбором количества слоев НС и числа нейронов в каждом слое [1, 2], либо к настройке параметров классического ПИД-регулятора [3]. Наиболее эффективной считается приближенная к динамическому программированию адаптивно-

критическая схема, нашедшая применение в современных SMART GRID технологиях [4].

Преодоление указанных сложностей возможно за счет поэтапного решения задачи синтеза адаптивного параметрического нейрорегулятора: изначально исследуется выбранный класс нелинейных систем на устойчивость; затем синтезируется стабилизирующее управление u , обеспечивающее цель адаптации: $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \vec{0}$; по условиям устойчивости инициализируются параметры НС.

В докладе рассматриваются второй и третий этапы задачи синтеза.

2. Параметрический синтез стабилизирующего нейрорегулятора

В качестве эффективного алгоритма, реализующего способ обратного распространения ошибки сигнала, в докладе предлагается использовать схему метода скоростного градиента (МСГ) [5].

Формулировка задачи синтеза стабилизирующего управления по МСГ сводится к следующему.

Состояние j -го ТМ – $x \in R^n$, управление u – скалярное, наблюдается скалярная величина $z = c^T x \in R^1$. Эволюцию j -го ТМ описывает дифференциальная система:

$$(1) \quad \dot{x} = Ax + B(u + \sigma(t, z, u)) + \xi$$

$$(2) \quad z = c^T x,$$

$$(3) \quad u = Lz,$$

где измеряемая кусочно-дифференцируемая функция $\sigma(t, z, u)$ является аддитивной добавкой к скалярному управлению u и подчинена ограничению вида

$$(4) \quad 0 \leq z u \sigma \leq \tilde{q}_1 \alpha z^2 + \tilde{q}_2 \beta u^2,$$

B – постоянный n – вектор настраиваемых входных параметров (коэффициентов синоптических связей однослойной НС). Управление линейно зависит от наблюдаемой величины: $u = Lz$.

Матрица A и вектор B заранее неизвестны. Вектор c , учитывающий «вклады» переменных состояния x в наблюдение z , задается.

Требуется синтезировать параметрический регулятор $L = L(t)$.

Цель управления – выполнение условия $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \vec{0}$ – соответствует минимизации в пределе локального функционала $J(t) = 0,5 x^T H x$, где H – положительно определенная, симметрическая матрица размерности $n \times n$.

Для синтеза нелинейного параметрического регулятора применим схему МСГ в дифференциальной форме [5].

Для этого определим полную производную от локального функционала

$$\dot{J}(t) = 0,5 (x^T H \dot{x} + \dot{x}^T H x) = x^T H [(A + LBc^T)x + B(\frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L} + \tilde{q}_2 \beta L)]$$

и вычислим градиент по параметру L

$$\nabla_L \varphi(x, L) = x^T H B (z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta).$$

По схеме МСГ синтезируемый в дифференциальной форме нелинейный скалярный регулятор имеет вид

$$\dot{L} = -\gamma \nabla_L \varphi(x, L).$$

Для системы (1)-(3) при ограничениях на функцию активации (ФА) типа (4) алгоритм адаптации (обучения) j -го ТМ записывается в виде

$$(5) \quad \dot{L} = -\gamma x^T H B \left(z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta \right),$$

где $\gamma > 0$ – положительное число, определяющее скорость убывания градиента по параметру L .

По постановке задачи процедура управления должна зависеть только от наблюдаемой величины z . Поэтому в (5) потребуем соблюдения равенства

$$(6) \quad H B = c.$$

Тогда с учетом того, что $c^T = B^T H$, в окончательном виде получим алгоритм адаптации j -го ТМ

$$(7) \quad \dot{L} = -\gamma \left(z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta \right) z,$$

где $\tilde{q}_2 \in [0, 1]$, $\tilde{q}_1 = 1 - \tilde{q}_2$ – параметры, определяющие режим работы НС.

Формула (7) справедлива в областях, для которых $L > L^+$, $L < L^-$ и функция $\sigma(L)$ близка к линейной зависимости. Параметрический регулятор L в этих областях изменения аргумента является квазилинейным. Параметр γ в законе управления (7) реко-

мендуется выбирать из условия: $\gamma \geq \sqrt{\frac{\tilde{q}_1 \alpha}{\tilde{q}_2 \beta}}$.

В области, ограниченной вертикальными L^\pm и горизонтальными σ^\pm асимптотами функции активации $\sigma(t, z, u) = \sigma(L) = \tilde{q}_1 \frac{\alpha}{L} + \tilde{q}_2 \beta L$ возникают скользящие режимы, для обеспечения асимптотической устойчивости которых при измерении r первых фазовых координат вместо формул (3), (7) параметрического регулятора используется закон управления с разрывными коэффициентами [6, с. 249]. В нашем случае решения для задачи стабилизации принимаем $r = 1$ и закон управления вида

$$(8) \quad u = -Lz - \delta_u, \quad L = \begin{cases} L^+, & zs > 0, \\ L^-, & zs < 0, \end{cases}$$

$$(9) \quad \delta_u = \begin{cases} \delta_0, & s > 0, \\ -\delta_0, & s < 0, \end{cases} \quad \delta_0 = |\delta_0| \text{sign}(c^T B).$$

Здесь δ_0 – сколь угодно малое отличное от нуля число, знак которого совпадает со знаком скаляра $c^T B$, а поверхность переключения определяется вторым сомножителем формулы (7)

$$(10) \quad s(z) = z - \frac{\tilde{q}_1 \alpha}{L^2} + \tilde{q}_2 \beta$$

Производная по времени от функции s в силу уравнений (10) имеет вид

$$(11) \quad \dot{s}(z) = \dot{z} + \frac{3\tilde{q}_1 \alpha}{L^3} \dot{L}.$$

Условия осуществления скольжения при аксиоматическом подходе определяются неравенствами [6]:

$$(12) \quad \dot{s}^+ = \lim_{s(x) \rightarrow +0} \dot{s} < 0, \quad \dot{s}^- = \lim_{s(x) \rightarrow -0} \dot{s} > 0.$$

Указанные условия (12) отделяются друг от друга многообразием $\dot{s}^+ = 0$ или $\dot{s}^- = 0$, или в общем случае $\dot{s} = 0$.

Условие попадания изображающей точки на поверхность скольжения имеет вид [6]

$$(13) \quad s(z)\dot{s}(z) < 0.$$

и соответствует условиям: $z\dot{z} < 0, L\dot{L} < 0$.

Искомое многообразие $\dot{s}(z) = 0$ определяется из формулы (11)

$$(14) \quad \dot{s}(z) = \dot{z} + \frac{3\tilde{q}_1\alpha}{L^3}\dot{L}.$$

Учитывая, что в области скользящих режимов при $L = L^+$ или $L = L^-$ закон управления (7) приобретает вид

$$(15) \quad \dot{L} = -\gamma z^2,$$

после подстановки формулы (12) в равенство (11) получим уравнение скользящего движения

$$(16) \quad \dot{z} = \frac{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}{L^3}z^2,$$

где параметр $L = L^\pm$ согласно формуле (8) имеет одно из возможных значений L^+ или L^- .

Решение уравнения скользящего движения (16) может быть получено в аналитическом виде через разделение переменных

$$\frac{dz}{z^2} = \frac{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}{(L^\pm)^3} dt,$$

после интегрирования его правых и левых частей

$$(17) \quad z = \frac{(L^\pm)^3}{3\tilde{q}_1\alpha\gamma t} + C = \pm \frac{\lambda_1}{t} + C,$$

где $\lambda_1 = \frac{(|L^\pm|)^3}{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}$ – варьируемый коэффициент пропорциональности, C – константы, определяемые различными начальными условиями $z(0)$.

Семейство кривых (17) представляют собой функции обратно пропорциональных зависимостей $z = f(t)$ от времени (рис. 1), в I и IV квадрантах относительно оси времени. Анализ этих кривых показывает, что при $t \rightarrow \infty$ функция z стремится к нулю. Тем самым при организации скользящего движения достигается цель адаптации: $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = z_* = 0$ по выходу системы (1)-(3) в задаче стабилизации. Так как при $t \rightarrow \infty$ наблюдаемая величина $z \rightarrow 0$, то в силу уравнений (17), (3) в области скользящих режимов параметр L и управление u также стремятся к нулю.

Фазовый портрет движения изображающей точки согласно уравнению скользящего движения (16) определяется семейством парабол $\dot{z} = f(z) = \pm \lambda_2 z^2$, симметричных вверх и вниз относительно оси z (рис. 2). Здесь $\lambda_2 = \frac{3\tilde{q}_1\alpha\gamma}{(|L^\pm|)^3}$ – варьируемый коэффициент пропорциональности.

3. Заключение

Достижение системой (1)-(3) по выходу z естественной цели адаптации: $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = z_* = 0$, т.е. достижение ограниченного предельного множества, определяет основное свойство абсолютно устойчивых систем – диссипативность [7, с. 403]. В нашем случае свойство диссипативности обеспечивает грубость системы к внешним возмущениям за счет введения зоны нечувствительности σ^\pm в функции $\sigma(L)$, грубость системы к параметрическим возмущениям за счет введения зоны нечувствительности L^\pm параметра регулятора L (рис. 2) и грубость системы к динамическим возмущениям за счет введения дополнительной обратной связи по выходу z .

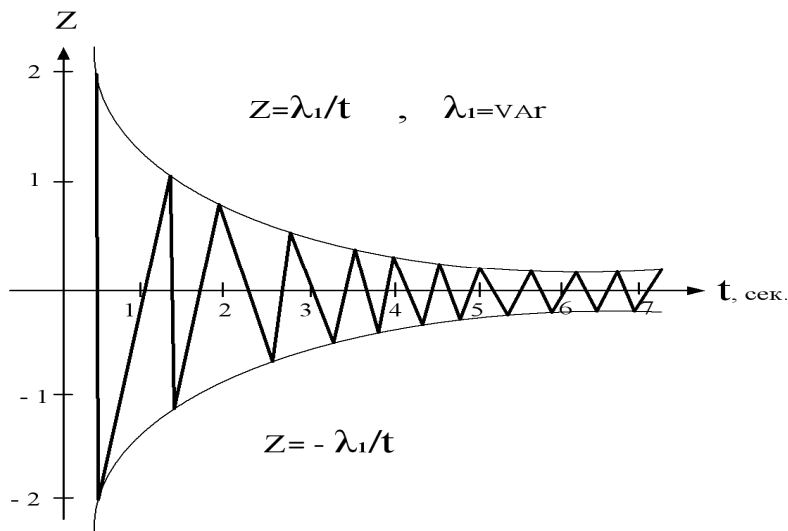


Рис. 1. Организация скользящего движения системы (1)-(3).

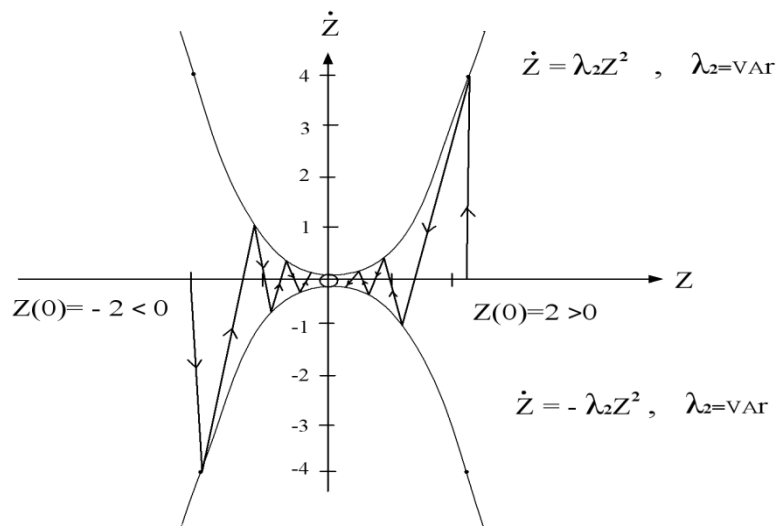


Рис. 2. Фазовый портрет скользящего движения системы.

Список литературы

1. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления // Нейроконтроллеры и их применение / Под ред. А.И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2002. 480 с.

2. Крылов А.А., Озеров В.Н., Сизых В.Н. Нейросетевая система автоматического управления самолетом в режиме демпфирования. // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та, 2011. №1. Том 7. С. 189-194.
3. Sizykh V.N., Daneev A.V., Dambaev J.G. Methodology of Approximately Optimal Synthesis of Fuzzy Controllers for Circuit of Improvement and Localization // Far East Journal of Mathematical Sciences. 2017. Vol. 101, No. 3. P. 487-506.
4. Sizykh V.N., Daneev A.V. Associating Automat for Technological Processes Adaptive Control on Based of Neural Networks // Helix. 2018. Vol. 8, No. 2. P. 3046-3054.
5. Фрадков А.Л. О применении кибернетических методов в физике // Успехи физических наук. 2005. Т. 175, № 2. С. 113-138.
6. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит, 2004. 464 с.
7. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 448 с.