

8. Zhuravlev Yu. I. Teoretiko-mnozhestvennyye metody v algebre logiki. *Problemy kibernetiki*. 1962. N. 8 (1). P. 25–45.
9. Kudryavtsev V. B., Andreev A. E. O slozhnosti algoritmov. *Fundamental'naya i prikladnaya matematika*. 2009. N. 15 (3). P. 135–181.
10. Lupanov O. B. O slozhnosti realizatsii funktsiy algebry logiki formulami. *Problemy kibernetiki*. 1960. Iss. 3. P. 61–80.
11. Yablonskiy S. V. Ob algoritmicheskikh trudnostyakh sinteza minimal'nykh kontaktnykh skhem. *Problemy kibernetiki*. 1959. N. 2. P. 75–121.
12. Pospelov D. A. Logicheskie metody analiza i sinteza skhem. Izd. 3-e, pererab. i dop. M.: Energiya, 1974. 368 p.
13. Cheburakhin I. F. Matematicheskie modeli dlya minimizatsii i avtomatizatsii sinteza diskretnykh upravlyayushchikh system. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2012. N. 4. P. 5–13.
14. Cheburakhin I. F. O logicheskom upravlenii i obpabotke informatsii v diskretnykh tekhnicheskikh sistemakh na osnove funktsional'nykh uravneniy. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013. N. 11 P. 9–16.
15. Shannon Claude E. The Synthesis of Two-Terminal Switching Circuits. *Bell System Technical Journal*. 1949. N. 28. P. 59–98.
16. Khoskin R. Kak vybrat' podkhodyashchuyu PLIS. *Elektronnye komponenty*. 2008. N. 1. P. 38–42.
17. Virtex-4 Family Overview. Xilinx Inc. Cop. 2011. URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds112.pdf
18. Virtex-7 FPGAs Data Sheet: DC and Switching Characteristics. DS183 (v1.0) March 1, 2011. Xilinx Inc. Cop. 2011. URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds183_Virtex_7_Data_Sheet.pdf.
19. Shalagin S. V. Eksperimental'noe issledovanie metodiki sinteza kombinatsionnykh skhem na programmirovemykh mikroskhemakh klassa FPGA. *Mikroelektronika*. 2004. V. 33, N. 1. P. 56–67.
20. Shalagin S. V. O predstavlenii nelineynykh polinomov nad konechnym polem raspredelennoy vychislitel'noy sistemoy. *Nelineynyy mir*. 2009. N. 5. P. 376–379.

УДК 621.311.23:629.12

Ю. Н. Хижняков, д р техн. наук, проф., luda@at.pstu.ru,
 А. А. Южаков, д р техн. наук, проф., зав. кафедрой, uz@at.pstu.ru,
 Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Робастное управление недетерминированным объектом с применением многоуровневой обратной связи

Рассматривается робастное управление недетерминированным объектом с применением адаптивного нечеткого регулятора, адаптивной нечеткой обратной связи, реализованной на базе многоуровневого релейного элемента, управляемого текущим значением частотного показателя колебательности. Разработан адаптивный нечеткий регулятор и приведен алгоритм управления коэффициентом обратной связи в системе регулирования.

Ключевые слова: робастное управление, недетерминированный объект, адаптивный нечеткий регулятор, нечеткая обратная связь, частотный показатель колебательности, адаптивный нейрон, многоуровневый релейный элемент

Введение

Современные проблемы автоматизации сложных нелинейных (недетерминированных) объектов связаны с отсутствием их математического описания. Примерами таких объектов могут быть источники электроэнергии, работающие параллельно, авиационный двигатель, объекты с внутренним противоречием управления и т. д. Как правило, недетерминированные объекты разного класса требуют разного рода управления: группового, многорежимного, нечеткого, нечетко-нейронного и других видов управления. Так, например, групповое управление требуется для управления параллельной работой источников электроэнергии (синхронных генераторов и т. д.). Для управления ими разработаны разные методы: статических характеристик, мнимостатических характеристик, квазиататических характеристик и т. д. [1, 2].

Недетерминированный объект, например, авиационный двигатель, имеющий один вход (дозирующее устройство) и несколько выходов (частоты вращения свободной турбины, ротора компрессора высокого давления, вентилятора турбореактивного двигателя, температура газа в камере сгорания, давление воздуха за компрессором высокого давления

и т. д. при работе на Земле, взлете и крейсерской скорости), требует многорежимного управления [3].

Нечеткое управление недетерминированными объектами с нечетким математическим описанием снимает неопределенность в системах реального времени с помощью алгоритмов Заде, Мамдани, Ларсена, Тсукамото, Сугено-Такаги. Недостатком нечеткого управления является отсутствие адаптивности, которое устраняется методами стохастической аппроксимации: Уидроу-Хоффа, последовательного обучения и т. д. [4]. Дальнейшее развитие нечеткого управления с применением нейронных сетей вылилось в нейронечеткое управление (например, на основе нейросети *Anfis* и ее модификации с применением нечетких алгоритмов Сугено-Такаги, Ванга—Менделя и *TSK*) [4, 17].

Разработка управления недетерминированными объектами в системах реального времени связана с проблемой устойчивости, снижающей область практического применения. Однако с начала 1980-х годов и до настоящего времени разрабатываются методы анализа, где в разной степени используют динамические модели регулируемого объекта и/или регулятора. В работе [5] рассмотрены автоматные и реляционные нечеткие динамические

модели и системы и методы исследования их устойчивости. Автоматные нечеткие динамические модели (матрицы решений) пригодны для описания регуляторов, имеющих один выход и не более, чем два входа. Реляционные уравнения отношений имеют больше теоретическую, чем практическую ценность. В работе [6] авторы применяют метод Ляпунова для исследования устойчивости нечетких систем управления.

Проблему автоматизации регулируемого объекта при отсутствии его математического описания впервые (в 1942 г.) решили Никольс и Циглер, которые при поиске оптимальных настроек ПИД регулятора использовали декремент затухания, равный четырем [7]. Данный метод использует аппроксимацию объекта моделью второго порядка. Процесс настройки ПИД регулятора по методике Циглера—Никольса осуществляется на этапе пусконаладочных работ на реальном объекте с учетом его статических характеристик. В дальнейшем настройки регулятора остаются неизменными и не меняются при длительном времени эксплуатации объекта. В отличие от Циглера и Никольса, авторы Chien, Hrones и Reswick разработали *CHR*-метод [8], где использовали критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования или при наличии 20 %-го перерегулирования. Такой критерий позволяет получить больший запас устойчивости, чем в методе Циглера—Никольса. *CHR*-метод дает две разные системы параметров: первая система получена при наблюдении отклика на изменение уставки, а вторая — при наблюдении отклика на внешние возмущения. Выбор системы зависит от того, что важнее для регулятора — качество регулирования при изменении уставки или ослабление внешних воздействий. *CHR*-метод использует аппроксимацию объекта моделью первого порядка с задержкой. Данные аналитические (формульные) методы настроек регуляторов при наличии мощных контроллеров и персональных компьютеров утратили свою значимость с появлением метода активной адаптации [9]. Согласно данному методу периодически с определенным интервалом времени проводится идентификация объекта для определения коэффициентов модели объекта, структура передаточной функции которой задана, а затем выполняется коррекция настроек ПИ регулятора. Итерационная процедура идентификации и оптимизации (ИПИО) объекта успешно применяется в настоящее время для автоматизации нелинейных объектов с переменными параметрами. К недостаткам ИПИО можно отнести невозможность использования передаточной функции эталонной модели с комплексными корнями. С появлением нечеткого управления процедура ИПИО была заменена коррекцией компонент ПИД регулятора тремя не-

четкими регуляторами [10]. Данная методика может успешно применяться и для релейно-импульсных ПИД регуляторов (РИПИД регуляторы) [11].

1. Робастные системы управления

Теория робастных систем управления рассматривает методы и алгоритмы повышения устойчивости реальных систем автоматического регулирования (САР) при воздействии возмущающих факторов. Основная проблема заключается в поиске методов (критериев) устойчивости системы как с детерминированными, так и с недетерминированными объектами.

Робастность означает малое изменение выхода замкнутой системы при малом изменении параметров объекта. При робастном управлении детерминированным объектом рассматриваются два вида неопределенностей: структурные и параметрические.

Структурные неопределенности в системе возникают из-за присутствия элементов, зависящих от частоты (например, возмущений в низкочастотной области АФЧХ объекта управления), и оцениваются с помощью критерия робастности:

$$|\Phi(j\omega)\Delta_M(j\omega)| \ll 1,$$

где $\Phi(j\omega) = \frac{F(j\omega)W_0(j\omega)}{1 + F(j\omega)W_0(j\omega)}$ — частотная передаточная функция САР; $\Delta_M(j\omega) = \frac{\Delta_A(j\omega)}{W_0(j\omega)}$ — мультипликативная погрешность; $\Delta_A(j\omega) = W(j\omega) - W_0(j\omega)$ — аддитивная погрешность; $W_0(j\omega)$ — заданная частотная передаточная функция детерминированного объекта; $F(j\omega)$ — частотная передаточная функция контроллера.

Воздействие параметрических неопределенностей при наличии заданной структуры передаточной функции детерминированного объекта может быть как аддитивным (рис. 1), так и мультипликативным (рис. 2).

Параметрическую неопределенность при известной структуре детерминированного объекта можно исследовать с помощью полиномов В. Л. Харитонов [12] либо с применением теоремы о малом коэффициенте усиления [13].

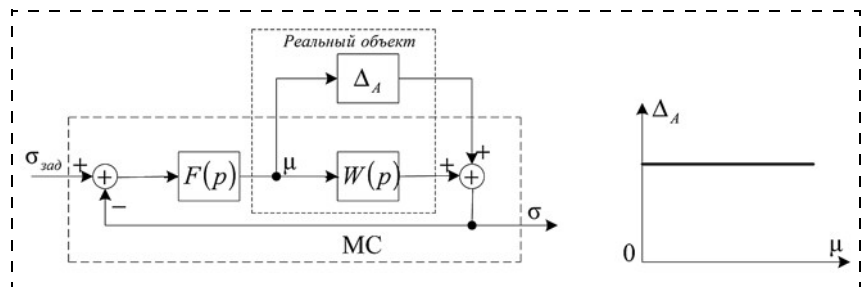


Рис. 1. САР с аддитивным реальным объектом: $W(p) = W(p)_{\text{ном}} + \Delta_A$; МС — модель номинальной схемы системы; $F(p)$ — передаточная функция контроллера; Δ_A — аддитивная погрешность

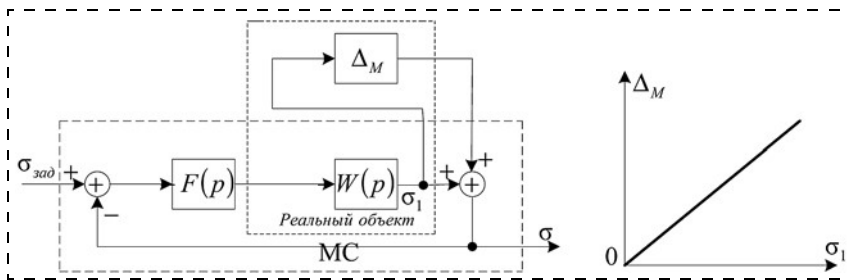


Рис. 2. САР с мультипликативным реальным объектом:
 $W(p) = (1 + \Delta_M)W(p)_{\text{ном}}$; МС — модель номинальной схемы системы; $F(p)$ — передаточная функция контроллера; Δ_M — мультипликативная погрешность

Целью робастного анализа (определения границы устойчивости) является поиск такой неопределенности $\Delta = \Delta_A + \Delta_M$, при которой система становится неустойчивой. В ходе анализа решаются две задачи:

- определение модели неопределенностей;
- приведение структурной схемы системы к стандартному (МС— Δ)-виду, когда все неопределенности структурно отделяются от номинальной схемы системы, как показано на рис. 3.

По критерию робастной устойчивости система (МС— Δ)-вида устойчива при любых $\Delta(p)$, удовлетворяющих неравенству:

$$\sigma[\Delta(j\omega)] \ll \frac{1}{\sigma[M(j\omega)]}.$$

Этот критерий обеспечивает достаточные условия робастной устойчивости.

Целью задачи синтеза робастной системы управления является поиск закона управления, который сохранял бы выходные переменные системы и сигналы ошибки в заданных пределах, несмотря на наличие неопределенности в контуре управления детерминированного объекта. В робастном синтезе требуется определить передаточную функцию контроллера $F(p)$ для соответствия критерию робастности в другой форме записи:

$$\frac{1}{\inf\left[\frac{\sigma_n(\Delta)}{\det[(1 - \Phi(j\omega))\Delta]}\right]} \ll 1,$$

где $\inf\left[\frac{\sigma_n(\Delta)}{\det[(1 - \Phi(j\omega))\Delta]}\right] = K_M[\Phi(j\omega)]$; $\Delta = (\Delta_A + \Delta_M)$ — матрица неопределенностей; σ_n — сингулярное

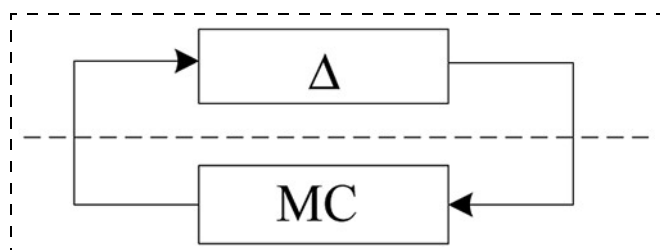


Рис. 3. Структурная схема робастной системы в (МС— Δ)-виде

число матрицы неопределенностей; $[\Phi(j\omega)]$ — АЧХ замкнутой САР; Inf — неопределенность; \det — общий определитель; K_M — размер наименьшей неопределенности.

K_M рассчитывается на каждой частоте, которая может сделать систему неустойчивой.

Рассмотренные методы и алгоритмы для исследования робастной устойчивости детерминированных объектов с различными типами неопределенностей не пригодны для исследования робастной устойчивости недетерминированных объектов, математическое описание которых неизвестно.

Поиск компромисса между устойчивостью и качеством работы системы управления с применением нечеткой обратной связи для обеспечения адаптивности и устойчивости управления недетерминированными объектами является актуальной задачей.

Для контроля гарантируемого запаса устойчивости и контроля качества переходного процесса в САР в качестве датчика принят частотный показатель колебательности M [9].

2. Определение гарантированного запаса устойчивости на базе частотного показателя колебательности M

Теория частотного показателя колебательности M основана на модифицированном критерии Найквиста, где опасная точка $(-1, j0)$ представлена в виде "запретной" окружности, куда не имеет право заходить "неоднозначный" годограф разомкнутой САР.

Для замкнутой одноконтурной САР частотный показатель колебательности M определяется как

$$M = \frac{A(\omega_p)}{A(0)},$$

где $A(\omega_p)$ и $A(\omega_0)$ — амплитудно-частотные характеристики замкнутой САР на резонансной частоте ω_p и на нулевой частоте ω_0 , соответственно.

Пусть $W_{PC}(s)$ — передаточная функция разомкнутой системы; $\text{Re} = \text{Re} W_{PC}(s)$, $\text{J} = \text{Im} W_{PC}(s)$. Тогда геометрическое место точек на комплексной плоскости $W(j\omega)_{PC}$ при условии

$$M = \frac{|\text{OA}|}{|\text{BA}|} = \text{const}$$

есть окружность

$$(\text{Re} - R)^2 + \text{J}^2 = r^2,$$

где $|\text{OA}|$ — длина отрезка (расстояние) между началом координат и точкой $(-1, j0)$; $|\text{BA}|$ — длина отрезка (расстояние) между точкой $(-1, j0)$ и вершиной радиуса-вектора годографа разомкнутой системы

$W_{PC}(j\omega_p)$; $R = \frac{M^2}{M^2 - 1}$ — расстояние удаления центра

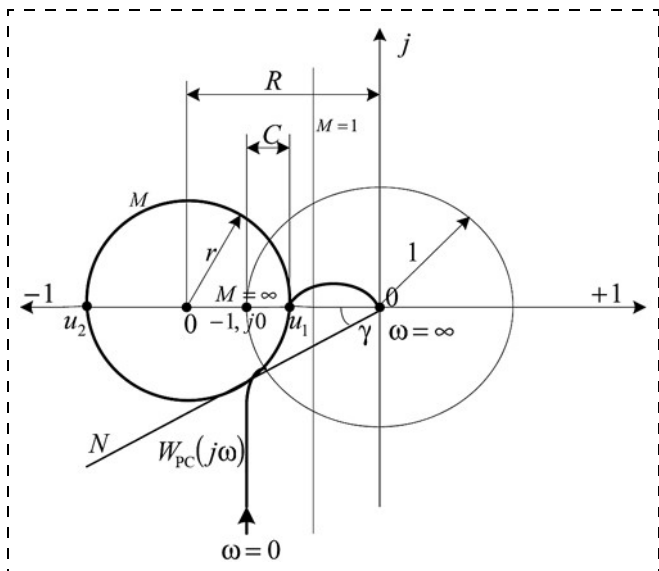


Рис. 4. К построению окружности с заданным индексом M

окружности от начала координат; $r = \frac{M}{M^2 - 1}$ — радиус окружности; $R = rM$; $1 \leq M \leq \infty$.

На рис. 4 показано построение области с заданным показателем колебательности M , куда запрещено заходить (касаться) АЧХ недетерминированного объекта.

Точки пересечения u_1, u_2 окружности с отрицательной действительной осью комплексной плоскости определяются следующим образом:

$$u_1 = |R| - r = \frac{M}{M+1},$$

$$u_2 = |R| + r = \frac{M}{M-1}.$$

Тогда при условии $M = 1$: $u_1 = 0, 5$; $u_2 = \infty$, и окружность вырождается в прямую линию, а при условии $M = \infty$: $r = 0$; $R = 1$, и окружность вырождается в точку.

Требование, чтобы максимум $|\Phi(j\omega)|$ не превышал заданного значения, сводится к тому, чтобы годограф $W_{PC}(j\omega)$ не заходил внутрь области, ограниченной окружностью с показателем колебательности M . Значение M выбирается в пределах $1,1 \dots 1,6$, чтобы учесть изменения характеристик недетерминированного объекта.

Запас по модулю при $M = \text{const}$ (рис. 4)

$$C = 1 - (R - r) = \frac{1}{M+1},$$

где C — отрезок между точкой $(-1; j0)$ и точкой пересечения отрицательной действительной оси с годографом $W_{PC}(j\omega)$, который численно показывает, на сколько можно изменить $|W_{PC}(j\omega)|$ при постоян-

ном фазовом соотношении для того, чтобы САР вышла на условную границу устойчивости.

Рассмотрим теперь запас по фазе γ системы при $M = \text{const}$ (рис. 4).

Для определения координаты точки пересечения единичной окружности с годографом разомкнутой системы запишем уравнения:

$$\text{Re}^2 + \text{J}^2 - \frac{2M^2}{M^2 - 1} \text{Re} + \frac{M}{M^2 - 1} = 0;$$

$$\text{Re}^2 + \text{J}^2 = 1.$$

Из решения данной системы уравнений находим координату $\text{Re} = 1 - \frac{1}{2M^2}$, и определяем

$$\gamma_{\text{пред}} = \arccos\left(1 - \frac{1}{2M^2}\right).$$

Запас по фазе есть угол γ , лежащий между вещественной отрицательной осью и лучом ON , проведенным из начала координат через точку пересечения годографа $W_{PC}(j\omega)$ с единичной окружностью, центр которой находится в начале координат. Численно угол γ показывает возможное отставание по фазе при условии $M = \text{const}$, чтобы САР оказалась на условной границе устойчивости.

Гарантируемый запас устойчивости реализуется нечеткой обратной связью с помощью устройства переключений коэффициента обратной связи САР.

3. Разработка многоуровневого устройства переключений коэффициента обратной связи САР

Из разных вариантов многоуровневого устройства (МУ) [16] выбран вариант реализации на базе одноуровневых триггерных устройств (ТУ) с регулируемой петлей гистерезиса, включенных параллельно в канале обратной связи и смещенных относительно друг друга вправо (влево) на равные (разные) интервалы скважности выходного сигнала.

ТУ аналогично триггеру Шмидта реализует релейную статическую характеристику с регулируемой петлей гистерезиса ϵ и отличается от него импульсным входом. В зависимости от отклонения частотного показателя колебательности $\Delta M = M_{\text{тек}} - M_{\text{мин}}$ ТУ формирует уровни МУ. На рис. 5 приведена его статическая характеристика, где характеристики i -х уровней имеют равную высоту ΔR , ширину петли гистерезиса и не смещены относительно друг друга [16]. В зависимости от настройки скважности включения и выключения ТУ₁, ..., ТУ_n срабатывают один или несколько ТУ, формируя сигнал обратной связи $l \Delta R$ (выход МУ).

Характеристики МУ на базе РЭ и ТУ [16] связаны между собой, поэтому целесообразно при

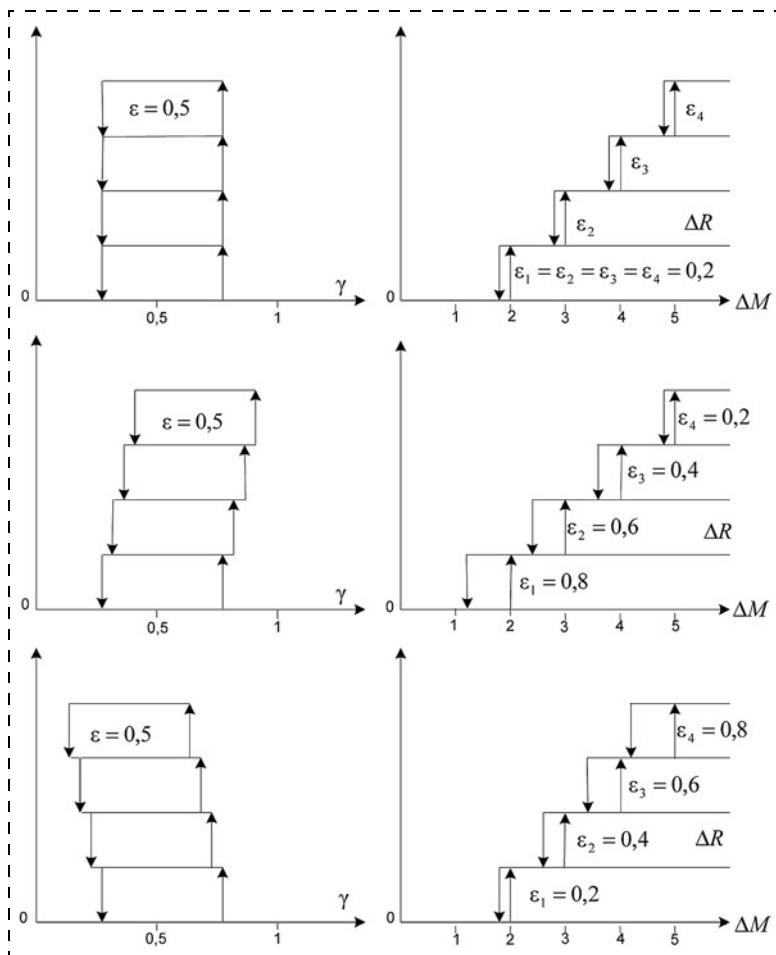


Рис. 5. Варианты соответствия статических характеристик МУ на базах РЭ и ТУ ($A_{гЛ} = 2$)

условии постоянства уровня переключений ($\Delta R = \text{const}$) определить их соответствие:

$$\gamma = \frac{A_{\text{имп}}}{2A_{\text{гЛ}}} \left(\Delta M - \sum_{l=1}^n Y_l \right),$$

где

$$Y_1 = \begin{cases} \Delta K, \Delta M \geq \Delta M_1; \\ 0, \Delta M < \Delta M_1; \end{cases}$$

$$Y_2 = \begin{cases} \Delta K, \Delta M \geq 2\Delta M_1; \\ 0, \Delta M < 2\Delta M_1; \end{cases}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$Y_n = \begin{cases} \Delta K, \Delta M \geq n\Delta M_1; \\ 0, \Delta M < n\Delta M_1; \end{cases}$$

$\frac{A_{\text{имп}}}{2A_{\text{гЛ}}}$ — коэффициент преобразования канала широко-импульсной модуляции (ШИМ-канала); $2A_{\text{имп}}$ — двойная амплитуда сигнала генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН); $A_{\text{имп}}$ — амплитуда сигнала ШИМ-канала МУ; ΔK_i — высота i -го релейного уровня МУ; l — число возбужденных релейных уровней МУ; n — число релейных уровней МУ; $\Delta M_1 = \gamma_1 - \gamma_2$ — шаг дискретизации МУ;

γ_1 — верхний уровень петли гистерезиса ТУ; $\gamma_2 = \gamma_1 - \varepsilon$ — нижний уровень петли гистерезиса ТУ; ε — заданная петля гистерезиса ТУ.

На рис. 5 показаны также варианты соответствия статических характеристик МУ на базе ТУ и РЭ. Смещение "столба" статической характеристики ТУ эквивалентно введению "гибкой" связи в нечеткую обратную связь контура управления.

Обратная связь в контуре управления недетерминированным объектом изменяется в интервале от нуля до единицы за счет изменения, например, сопротивления обратной связи операционного усилителя при переключениях МУ. При отсутствии колебаний текущего параметра МУ выдает сигнал, при котором коэффициент передачи операционного усилителя равен единице. При появлении колебаний текущего параметра за счет изменения свойств недетерминированного объекта МУ уменьшает дискретно коэффициент передачи операционного усилителя и ослабляет обратную связь в контуре управления при переключениях ТУ с шагом дискретизации скважности $\Delta\gamma$, равным, например, 0,6.

Разработанная методика повышения робастности управления может быть применена к данному классу недетерминированных объектов, если:

- недетерминированный объект, обладая свойством самовыравнивания, можно представить объектом третьего порядка с переменными отрицательными корнями;
 - недетерминированный объект, обладая свойством самовыравнивания, можно представить объектом второго порядка с переменными комплексно-сопряженными корнями с отрицательными действительными составляющими;
 - если известна структура недетерминированного объекта, обладающего свойством самовыравнивания, один из коэффициентов может изменяться как по величине, так и по знаку.
- Качество управления недетерминированного объекта определяется работой адаптивного нечеткого регулятора.

4. Разработка адаптивного нечеткого регулятора

Теория нечеткого управления широко рассмотрена в работе [4]. Рассматривается адаптивный нечеткий регулятор, содержащий адаптивный фаззификатор и блок активационных функций [17, 18], показанный на рис. 6. Выбор числа функций принадлежности (ФП) терм-множества фаззификатора традиционный (для инерционных (тепловых) объектов число ФП не более трех, для малоинерционных объектов (сверхпереходные процессы синхронного генератора) — от 7 до 11).

В качестве ФП можно задавать как линейные, так и нелинейные функции.

В адаптивном нейронном фаззификаторе выбрано пять нелинейных ФП (термов), представленных нелинейными функциями f_1, \dots, f_8 , которые заданы следующими соотношениями (рис. 6) [4]:

$$y_1 = \frac{1}{1 + \exp(-w_1(x + w_{c1}))};$$

$$y_2 = \frac{1}{1 + \exp(-w_2(x + w_{c2}))} - \frac{1}{1 + \exp(-w_3(x - w_{c3}))};$$

$$y_3 = \frac{1}{1 + \exp(-w_4(x + w_{c4}))} - \frac{1}{1 + \exp(-w_5(x - w_{c5}))};$$

$$y_4 = \frac{1}{1 + \exp(-w_6(x + w_{c6}))} - \frac{1}{1 + \exp(-w_7(x - w_{c7}))};$$

$$y_5 = \frac{1}{1 + \exp(-w_8(x - w_{c8}))},$$

где w_{ci} — параметры смещения сигмоидных ФП; w_i — вес суммарного сигнала на входе сигмоидных ФП; y_i — активизированные степени принадлежности фаззификатора синглетонам, синхронно связанным с входом x .

При выборе терм-множества фаззификатора недетерминированного объекта необходимо учитывать свойства объекта. Так, применительно к авиационному двигателю необходимо исключить терм НОРМА, так как последний является астатическим объектом. При выборе терм-множества фаззификатора применительно к синхронному генератору необходимо включить терм НОРМА, так как синхронный генератор есть статический объект. (Терм

НОРМА определяет значение управляющего воздействия при номинальном значении регулируемого параметра (напряжения СГ).)

Адаптация АНФ выполнена с помощью нейрона с последовательным обучением на основе рекуррентной формулы [19]

$$h_{j+1} = h_j + C(x_j - x_{jM}) \frac{u_j}{u_j^T u_j}, \text{ при } 0 \ll C \ll 2,$$

где h_{j+1} — последующий шаг ($j+1$)-й итерации; h_j — предыдущий шаг j -й итерации; x_j — дискретная форма j -й итерации; x_{jM} — оценка выхода модели; $(x_j - x_{jM})$ — ошибка в оценке x_j ; u_j — измеряемая функция; T — транспонирование.

В блоке активационных функций выбраны функции активации типа гиперболический тангенс [18]:

$$F(r) = \text{thr} = \frac{e^r - e^{-r}}{e^r + e^{-r}},$$

где $r = уф$.

Адаптация нечеткого регулятора достигается умножением текущих значений степеней принадлежности, активизированных текущим значением синглтона фаззификатора, на синапсы адаптивного нейрона. Полученные произведения коэффициентов являются аргументами функций активации, усиливающих слабый сигнал и ослабляющих сильный сигнал. В общем случае адаптивный нечеткий регулятор можно представить адаптивным пропорциональным звеном, которое может приспособливаться к любым изменениям ошибки отклонения текущего параметра, вызванным возмущениями на САР.

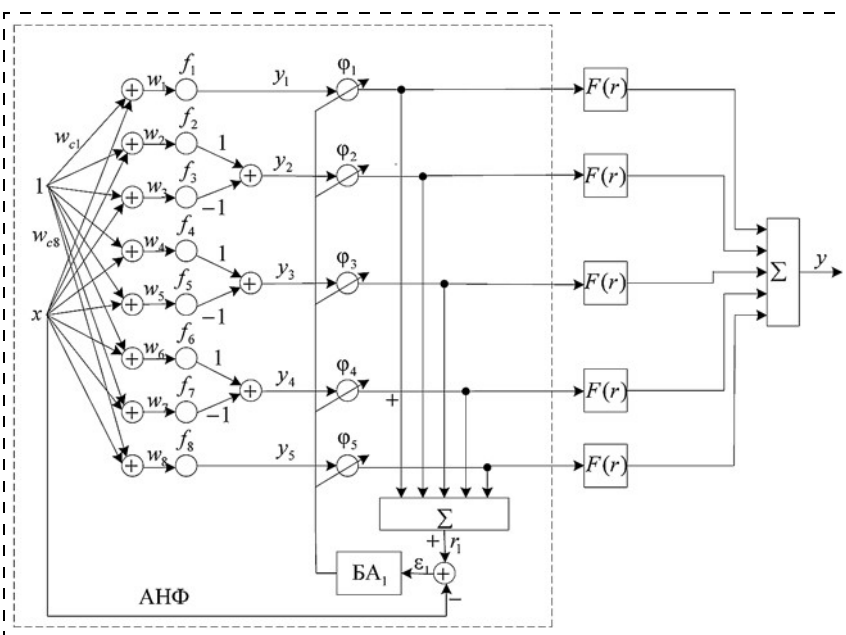


Рис. 6. Адаптивный нечеткий регулятор (АНФ): БА₁ — блок алгоритмов; ϕ_i — синапсы; x — отклонение текущего параметра от заданного значения; y — управляющее воздействие регулируемого объекта

Рассмотрим контур робастного управления недетерминированным объектом с применением адаптивного нечеткого регулятора и нечеткой обратной связи на базе многоуровневого релейного элемента.

5. Разработка контура управления недетерминированного объекта с применением нечеткой обратной связи

На рис. 7 приведена структура управления недетерминированным объектом, включающая основной контур управления и блок управления МУ нечеткой обратной связи.

Недетерминированный объект оснащен на выходе датчиком текущего параметра. Обратная связь в замкнутой САР реализуется с помощью МУ, которая в исходном состоянии равна единице. В текущем состоянии МУ уменьшает коэффициент обратной связи с увеличением ошибки на входе

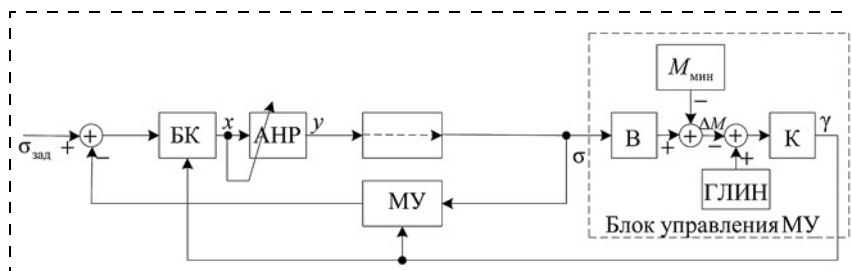


Рис. 7. Структура управления недетерминированным объектом: БК — блок коррекции; АНФ — адаптивный нечеткий регулятор; МУ — многоуровневое устройство; В — выпрямитель; ГЛИН — генератор линейно-изменяющегося напряжения; К — компаратор

АНФ. Для коррекции ошибки необходимо уменьшить ошибку регулирования пропорционально изменению коэффициента обратной связи с помощью блока коррекции (БК).

Блок управления МУ содержит выпрямитель (В), генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН), заданное минимальное значение M_{\min} , элементы сравнения и компаратор.

Блок управления МУ вычисляет текущее значение частотного показателя колебательности M , которое сравнивается с его минимальным заданным значением M_{\min} . Выявленное отклонение ΔM преобразуется с помощью ШИМ-приставки в скважность γ для дальнейшего управления МУ. При этом модель МУ корректирует (уменьшает с учетом знака) коэффициент усиления БК в основном контуре САР.

Таким образом, настройки МУ обеспечивают "гарантированный" запас устойчивости САР, а адаптивный нечеткий регулятор — необходимое качество переходного процесса. Этим самым разрешается противоречие между устойчивостью и качеством переходного процесса САР в данном классе недетерминированных объектов.

Заключение

1. Разработан датчик контроля текущих колебаний в САР на базе частотного показателя колебательности M .

2. Разработан адаптивный нечеткий регулятор для управления недетерминированным объектом с применением нейронной технологии.

3. Разработано многоуровневое устройство обратной связи, управляемое с использованием скважности, пропорциональной разности между текущим и минимальным заданными значениями частотного показателя колебательности M .

4. Разработана нечеткая обратная связь управления недетерминированным объектом.

5. Разработана методика построения робастной системы нечеткого адаптивного управления данным классом недетерминированных объектов с применением нечеткой обратной связи.

1. Москалев А. Г. Автоматическое регулирование режима электрической системы по частоте и активной мощности. М.-Л.: ГЭИ, 1960. 239 с.

2. Хижняков Ю. Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока. Пермь: изд. Перм. гос. техн. ун-та, 1999. 144 с.

3. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Адаптивное связанное управление ТВД с применением нейронной технологии // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 4. С. 35—39.

4. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 284 с.

5. Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю. Устойчивость нечетких автоматных и реляционных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 6. С. 2—12.

6. Кудинов Ю. И., Кудинов И. Ю. Устойчивость нечетких динамических производственных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 7. С. 6—19.

7. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. V. 64. P. 759—768.

8. Chien K. L., Hrones J. A., Reswick J. B. On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 74. P. 175—185.

9. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. Учеб. для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2004. 400 с.

10. Бобко В. Д., Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А. Оптимальная траектория как основа построения базы знаний нечеткого логического контроллера // РОИ-98. Распределенная обработка информации. Тр. шестого междунар. семинара. Новосибирск, Сибирское отделение РАН, 1998. С. 290—294.

11. Хижняков Ю. Н. Релейно-импульсное преобразование и его применение // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2010. № 2. С. 112—114.

12. Харитонов В. Л., Хинрихсен Д. Устойчивость вложенных семейств полиномов // Автоматика и телемеханика. 1997. № 3. С. 81—92.

13. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление (пер. с англ.) М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.

14. Андриевская Н. В., Леготкина Т. С., Хижняков Ю. Н. К вопросу статической устойчивости в системах нечеткого управления объектами // Матер. конф. "Управление в технических, эргодических, организационных и сетевых системах" (УТЭОСС-2012). Санкт-Петербург, 2012.

15. Андриевская Н. В., Хижняков Ю. Н. Исследование устойчивости нечеткого управления объектами // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2013. № 11. С. 7—11.

16. Хижняков Ю. Н. Теория многопозиционного релейного регулирования и ее приложение. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1999. 99 с.

17. Хижняков Ю. Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособ. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.

18. Хижняков Ю. Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособ. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 156 с.

19. Леготкина Т. С., Данилова С. А. Методы идентификации систем: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 123 с.

Robust Control of Non Deterministic Object Using Multilevel Feedback

Robust control of non-deterministic object (NO) is an urgent task, and there are different approaches to its solution. The paper considers an introduction of fuzzy feedback in the control loop of NO. The value of the feedback coefficient may range from logic zero (the gap feedback) to logic one. Process of increasing the oscillation in the control loop (NO) is controlled by the frequency of oscillation index. The numerical value of the frequency of oscillation index sets parameters of a "forbidden" circle, which includes the "dangerous" point with coordinates $-1, j0$. Changes in frequency response of NO will be countered by changing the parameters of a "forbidden" circle. In the control loop of the NO we introduce an adaptive nonlinear approximator (regulator). The controller is implemented on the basis of an adaptive neural fuzzificator and unit activation functions block. Activation function (sigmoidal unbalanced function) strengthen "weak" and weakening "strong" signals at the input. Adaptation of neural fuzzificator performed using neuron feedback with sequential learning. Control algorithm feedback coefficient is made on the basis of multilevel relay element (MRE). MRE controlled by duty cycle, proportional to the difference between the signals of the current and minimum values of the frequency of oscillation index. In the control loop of MO desired dynamics is provided by the adaptive fuzzy control, and stability — by fuzzy feedback. The main conclusions are the following: adaptive fuzzy controller to control the MO using neural technology is developed; control algorithm of fuzzy feedback control loop of NO is developed.

Keywords: robust stability, non-deterministic object adaptive fuzzy control, adaptive fuzzy feedback oscillation frequency component, the neuron adaptive, multilevel relay element

References

1. **Moskalev A. G.** Avtomaticheskoe regulirovanie rezhima elektricheskoy sistemy po chastote i aktivnoy moshchnosti. M.-L. GEI, 1960. 239 p.
2. **Khizhnyakov Yu. N.** Kombinirovanny metod upravleniya parallel'noy rabotoy generatorov peremennogo toka. Perm': izd. Perm. gos. tekhn. un-ta, 1999. 144 p.
3. **Khizhnyakov Yu. N., Yuazhakov A. A.** Adaptivnoe svyazannoe upravlenie TVD s primeneniem neyronnoy tekhnologii. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2014. N. 4. P. 35—39.
4. **Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S.** Nechetkie modeli i seti. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2007. 284 p.
5. **Kudinov Yu. I., Kudinov I. Yu.** Ustoychivost' nechetkikh avtomatnykh i relyatsionnykh dinamicheskikh system. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2010. N. 6. P. 2—12.
6. **Kudinov Yu. I., Kudinov I. Yu.** Ustoychivost' nechetkikh dinamicheskikh produktsionnykh system. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2011. N. 7. P. 6—19.
7. **Ziegler J. G., Nichols N. B.** Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*. 1942. V. 64. P. 759—768.
8. **Chien K. L., Hrones J. A., Reswick J. B.** On automatic control of generalized passive systems. *Trans. ASME*. 74. P. 175—185.
9. **Rotach V. Ya.** Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Ucheb. dlya vuzov. M.: Izdatel'stvo MEI, 2004. 400 p.
10. **Bobko V. D., Zolotukhin Yu. N., Nesterov A. A.** Optimal'naya traektoriya kak osnova postroeniya bazy znaniy nechetkogo logicheskogo kontrollera. *ROI — 98. Raspredeleonnaya obrabotka informatsii. Tr. shestogo mezhdunar. seminara*. Novosibirsk, Sibirskoe otdelenie RAN, 1998. P. 290—294.
11. **Khizhnyakov Yu. N.** Releyno-impul'snoe preobrazovanie i ego primeneniye. *Vestnik Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet*. 2010. N. 2. P. 112—114.
12. **Kharitonov V. L., Khinrichsen D.** Ustoychivost' vlozhennykh semeystv polinomov. *Avtomatika i telemekhanika*. 1997. N. 3. P. 81—92.
13. **Pegat A.** Nechetkoe modelirovanie i upravlenie (per. s angl.) M.: Binom. Laboratoriya znaniy, 2009. 798 p.
14. **Andrievskaya N. V., Legotkina T. S., Khizhnyakov Yu. N.** K voprosu staticheskoy ustoychivosti v sistemakh nechetkogo upravleniya ob'ektami. *Mater. konf. "Upravlenie v tekhnicheskikh, ergodicheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh" (UTEOSS—2012)*. Sankt-Peterburg, 2012.
15. **Andrievskaya N. V., Khizhnyakov Yu. N.** Issledovanie ustoychivosti nechetkogo upravleniya ob'ektami. *Neyrokomput'yutery: razrabotka, primeneniye*. 2013. N. 11. P. 7—11.
16. **Khizhnyakov Yu. N.** Teoriya mnogopozitsionnogo releynogo regulirovaniya i ee prilozheniye. Perm. gos. tekhn. un-t. Perm', 1999. 99 p.
17. **Khizhnyakov Yu. N.** Nechetkoe, neyronnoe i gibridnoe upravlenie: ucheb. posob. Perm': Izd-vo Perm. nats. issl. politekhn. un-ta, 2013. 303 p.
18. **Khizhnyakov Yu. N.** Algoritmy nechetkogo, neyronnogo i neyro-nechetkogo upravleniya v sistemakh real'nogo vremeni: ucheb. posob. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2013. 156 p.
19. **Legotkina T. S., Danilova S. A.** Metody identifikatsii sistem: ucheb. posobie. Perm': Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta, 2008. 123 p.