

Ю. А. Быковцев, аспирант, ассистент, bykovcev@mirea.ru,
МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва

Синтез нечеткого регулятора на основе оценки степени устойчивости системы управления

Обсуждается решение задачи анализа и синтеза системы управления с нечетким регулятором (нечеткой системы управления) на основе оценки степени устойчивости. По мере возрастания интереса к нечетким системам управления все более активно разрабатываются различные подходы к исследованию таких систем. Одно из наиболее активно развивающихся направлений основывается на модификации методов оценки областей устойчивости нелинейных САУ, однако, при решении большинства практических задач этих знаний недостаточно, поскольку разработчику необходимо обеспечить требуемые качественные характеристики переходного процесса (и, в частности, время регулирования). В основу предлагаемого решения положен критерий абсолютной устойчивости для системы с аппроксимированной нелинейной характеристикой нечеткого регулятора, которая может быть получена непосредственно на основе применения метода Сугено. В статье разрабатывается модифицированный под нечеткую систему управления круговой критерий абсолютной устойчивости Якубовича, использующий смещенную АФЧХ линейной части. При таком подходе удастся получить вполне конструктивное решение задачи синтеза параметров нечеткого регулятора в частотной области. На примере нечетких систем управления со статической и астатической линейными частями показаны особенности применения разработанного подхода и предложены методики синтеза параметров нечеткого регулятора. Проведен анализ влияния отдельных компонент нелинейного преобразования на качество переходного процесса, и на основе этого дан ряд практических рекомендаций по коррекции настроек нечеткого регулятора, обеспечивающих требуемое быстродействие.

Ключевые слова: степень устойчивости, нечеткий регулятор, абсолютная устойчивость, круговой критерий, нечеткая модель Сугено

Введение

По мере совершенствования современных быстродействующих САУ как военного, так и гражданского назначения острой становится потребность в разработке новых регуляторов и, соответственно, подходов к анализу и синтезу систем управления с такими регуляторами. С одной стороны, это объясняется известным принципом несовместимости, утверждающим обратную пропорциональность между сложностью системы и точностью ее анализа классическими математическими методами, а с другой — сложностью формализации неопределенностей, многочисленные источники которых имеют различную природу и проявляются по мере усложнения функциональных задач, стоящих перед системой управления. В то же время, появившиеся за последние несколько десятилетий работы как отечественных, так и зарубежных авторов доказывают перспективность применения для совершенствования характеристик системы управления интеллектуальных технологий и, в частности, технологии нечеткой логики [1–6].

В статье решается задача синтеза параметров нечеткого регулятора на основе косвенной оценки качества САУ — степени устойчивости. Такой вид оценки качества (и, в первую очередь, быстродействия) показал хорошую

эффективность и получил достаточно широкое распространение в инженерной практике синтеза линейных САУ [8–10].

Поскольку САУ с нечеткими регуляторами относятся к классу нелинейных систем, то непосредственно применить к ним предложенную методику синтеза невозможно. Однако в ряде классических работ (например, в [11]) показано, что рассматриваемый показатель качества можно распространить и на нелинейные системы, понимая под степенью устойчивости желаемый показатель затухания экспоненциальной кривой, который рассчитывается из условия нахождения "смещенной" системы на границе устойчивости. При таком подходе, рассматривая смещенную частотную характеристику линейной части, удобно решать задачу анализа и синтеза нелинейных законов на основе методов абсолютной устойчивости.

Постановка задачи

Рассматривается одноконтурная САУ с нечетким регулятором (нечеткая система управления), структурная схема которой представлена на рис. 1, а, где НР — нечеткий регулятор с одним входом и одним выходом, ЛЧ — линейная часть (объект управления) с передаточной функцией $W_{\text{ЛЧ}}(s)$. Требуется настроить НР

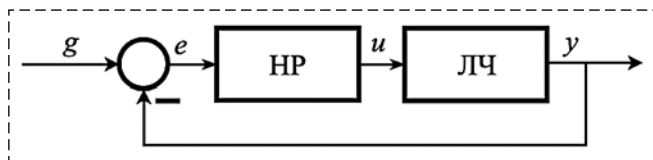


Рис. 1. Структурная схема САУ с НР
Fig. 1. Structural diagram of ACS with FR

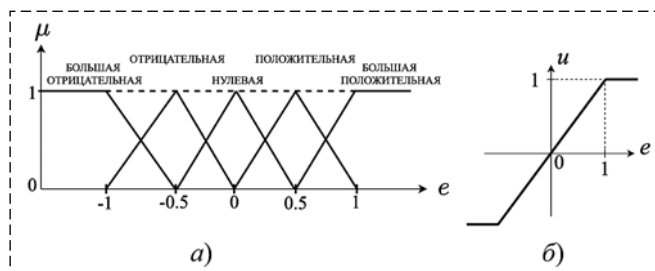


Рис. 2. Расположение ФП входных терм (а) и нелинейное преобразование НР (б)
Fig. 2. The location of the MF of the input terms (a) and the non-linear transformation of the FR (b)

таким образом, чтобы переходной процесс в системе был быстрее, чем $Ae^{-\eta_0 t}$, где A — начальное отклонение, η_0 — некоторая требуемая степень устойчивости.

В качестве первого приближения рассмотрим канонический вариант НР с пятью функциями принадлежности (ФП) для входной и выходной переменных. На рис. 2, а представлено расположение ФП входных терм НР, а на рис. 2, б — вид конечного нелинейного преобразования, полученного при следующей структуре продукционных правил:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 1$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,5$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,5$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -1$.

Для данного регулятора на рис. 3, б приведена переходная характеристика $e(t)$ ошибки в нечеткой системе совместно с кривой $e^{-\eta_0 t}$. Из рисунка видно, что равномерное распределение ФП входных терм не позволяет обеспечить поставленное перед САУ требование по степени устойчивости. Проведем (не давая специальных пояснений, которые будут обоснованы ниже) некоторую подстройку НР, изменив два продукционных правила:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 2$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -2$.

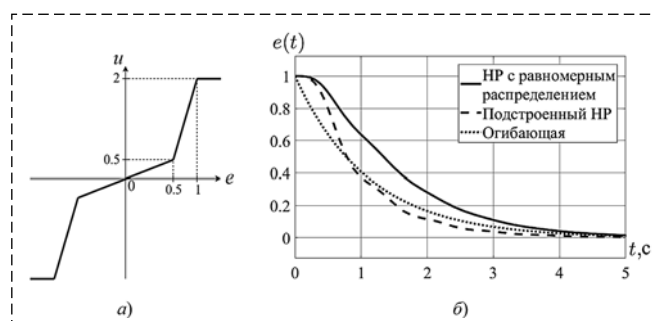


Рис. 3. Характеристика подстроенного НР (а) и переходные процессы в нечеткой САУ совместно с огибающей (б)
Fig. 3. Characteristic of the modernized FR (a) and transient processes in the fuzzy ACS together with the envelope (b)

Как видно, подстроенный НР обеспечивает нелинейное преобразование вход—выход, представленное на рис. 3, а, соответствующий переходной процесс отвечает поставленному требованию (рис. 3, б).

Выполненная в приведенном выше примере подстройка НР была реализована на основе некоторого опыта работы с нечеткими системами. Однако, используя известные в ТАУ результаты в области исследования устойчивости и качества нелинейных САУ, можно построить достаточно простую и удобную для инженерной практики методику, которая будет разработана ниже.

Анализ нечеткой системы управления на основе смещенной частотной характеристики

Рассмотрим совместно с исходной передаточной функцией линейной части $W_{\text{ЛЧ}}(s)$ смещенную передаточную функцию, полученную заменой $s = j\omega - \eta$, где η — аналог степени устойчивости. Для большей конкретности передаточную функцию линейной части возьмем в виде

$$W_{\text{ЛЧ}}(s) = K_{\text{ЛЧ}}[a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4]^{-1}.$$

После элементарных преобразований частотная характеристика смещенной линейной части $\bar{W}_{\text{ЛЧ}}$ приводится к виду

$$\bar{W}_{\text{ЛЧ}}(j\omega - \eta) = K_{\text{ЛЧ}} \left[\frac{a}{a^2 + b^2} - j \frac{b}{a^2 + b^2} \right], \quad (1)$$

где

$$a(\omega, \eta) = a_0 \eta^4 + a_0 \omega^4 - 6a_0 \omega^2 \eta^2 + 3a_1 \omega^2 \eta - a_1 \eta^3 + a_2 \eta^2 - a_2 \omega^2 - a_3 \eta + a_4,$$

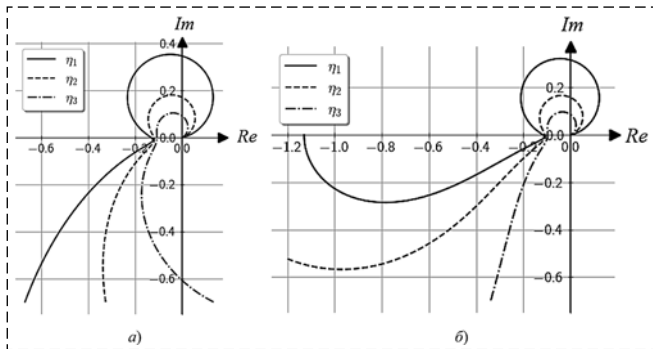


Рис. 4. АФЧХ статической (а) и астатической (б) линейных частей при разных значениях степени устойчивости

Fig. 4. Nyquist plot of the static (a) and astatic (b) linear part with different values of the degree of stability

$$b(\omega, \eta) = 4a_0\omega^3\eta - 4a_0\omega\eta^3 + \\ + 3a_1\omega\eta^2 - a_1\omega^3 - 2a_2\omega\eta + a_3\omega.$$

На рис. 4 представлены смещенные АФЧХ статической (рис. 4, а) и астатической ($a_4 = 0$) (рис. 4, б) версий линейной части при различных значениях степени устойчивости η ($\eta_1 > \eta_2 > \eta_3$).

Для исследования устойчивости нечеткой системы со смещенной линейной частью и определения граничных значений параметров НР, соответствующих заданной степени устойчивости, предлагается использование методов абсолютной устойчивости.

В работе [7] показано, что анализ нечетких САУ существенно упрощается, если рассматривать не гладкую, а аппроксимированную нелинейную характеристику НР, на которой выделяются два кусочно-линейных участка с коэффициентами усиления K_1 и K_2 (участки "малого" и "большого" коэффициентов усиления соответственно). В таком случае предпочтительно использовать модель Сугено в качестве механизма нечеткого логического вывода с постоянными функциями принадлежности выходных терм, так как с помощью нее удастся сразу получить кусочно-линейную характеристику НР без дополнительной аппроксимации.

Следует подчеркнуть, что данный подход для определенного класса нелинейных систем рассматривался в работе [11] и был построен на базе критерия абсолютной устойчивости В. М. Попова, который позже применялся к системе со смещенной АФЧХ линейной части. Более конструктивное решение может быть получено на основе критерия Якубовича, разработанного в работе [12]. Теорема, сформулированная в ней и модифицированная под нечеткую систему, может

быть представлена следующим образом: для абсолютной устойчивости нечеткой системы из класса $(K_1; K_2)$, имеющей степень устойчивости не менее η , достаточно, чтобы смещенная АФЧХ линейной части располагалась вне круга, ограниченного окружностью с центром на вещественной оси в точке $-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right)$, проходящей через точки $-\frac{1}{K_1}$ и $-\frac{1}{K_2}$, также принадлежащие действительной оси. Причем, так как вариантов расположения окружности с центром на действительной оси может быть несколько, смещенная АФЧХ при $-\infty \leq \omega \leq +\infty$ должна охватывать любую внутреннюю точку области $\left[-\frac{1}{K_1}; -\frac{1}{K_2}\right]$ столько раз, сколько полюсов передаточной функции линейной части располагаются в области $\Re s > -\eta$. Данное обстоятельство крайне важно, так как если рассматривать астатический вариант линейной части, то ее передаточная функция всегда содержит один полюс, лежащий правее $-\eta$, а значит, смещенная АФЧХ должна один раз охватить какую-либо внутреннюю точку области. Графически это означает, что для таких систем соответствующая круговому критерию окружность должна располагаться правее крайней левой точки смещенной АФЧХ.

Покажем на ряде примеров процесс синтеза НР на основе предложенного критерия. Рассмотрим астатическую САУ, линейная часть которой описывается передаточной функцией четвертого порядка, где $K_{\text{лч}} = 1$, $a_0 = 0,01$, $a_1 = 0,05$, $a_2 = 0,65$, $a_3 = 1,6$, $a_4 = 0$. Для данной САУ зададимся степенью устойчивости $\eta = 1$, что соответствует затуханию переходной характеристики примерно за 3 с. Так как рассматриваемая линейная часть содержит четыре полюса — два чисто действительных (0 и $-2,72$) и два комплексно-сопряженных ($-1,14 \pm j7,58$), то для обеспечения выбранной степени устойчивости необходимо расположить окружность таким образом, чтобы смещенная АФЧХ охватила ее только один раз.

На рис. 5, а представлены смещенная АФЧХ линейной части ($\bar{W}_{\text{лч}}(j\omega - 1)$), а также окружность, пересекающая действительную ось в точках $-0,8$ и $-0,5$. Согласно вышеописанному критерию, для обеспечения требуемой степени устойчивости достаточно, чтобы нелинейная характеристика НР располагалась в секторе $\left(\frac{1}{0,8}; \frac{1}{0,5}\right)$ (рис. 5, б).

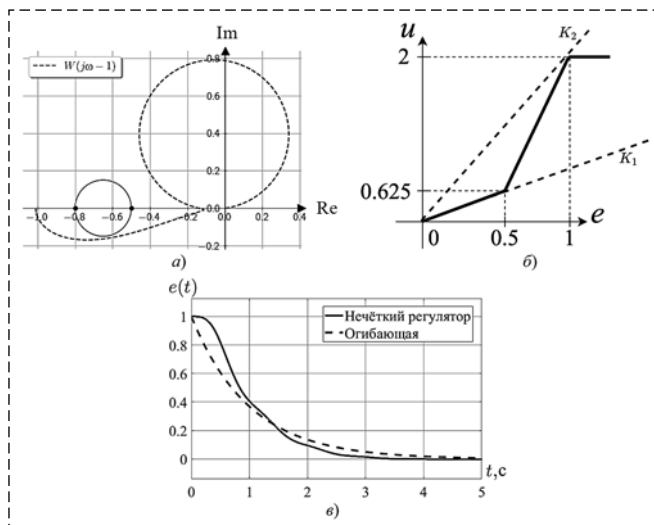


Рис. 5. Круговой критерий абсолютной устойчивости (а), нелинейная характеристика нечеткого регулятора (б) и сравнение переходного процесса с огибающей (в)

Fig. 5. Circular criterion of absolute stability (a), nonlinear characteristic of the fuzzy controller (b) and comparison of the transient process with the envelope (c)

На рис. 5, в представлен переходной процесс $e(t)$ в нелинейной САУ, содержащей нелинейный элемент с синтезированной характеристикой (рис. 5, б), при подаче единичного задающего воздействия, из которого очевидно выполнение задания. Для обеспечения нечетким регулятором данного нелинейного преобразования следует в параметрах регулятора изменить значения ФП выходных терм, не изменяя расположения ФП входных терм, а именно:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 2$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,625$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,625$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -2$.

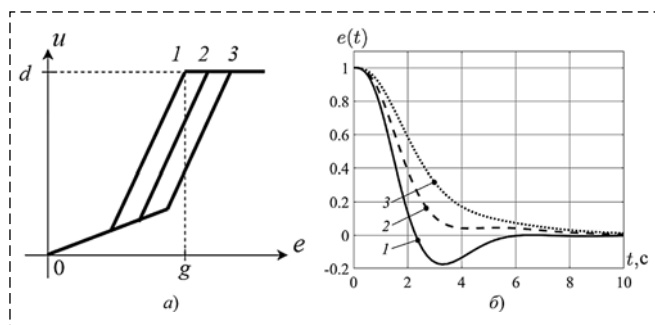


Рис. 6. Статические характеристики (а) и переходные процессы ошибки (б) при смещении участка "большого" коэффициента усиления

Fig. 6. Static characteristics (a) and error transients (b) when shifting the section of the "large" gain

Ввиду достаточности критерия абсолютной устойчивости, лежащего в основе рассматриваемой методики синтеза нелинейного закона управления НР, правомерно сделать следующее замечание: если по окончании процедуры синтеза статической характеристики НР возникает необходимость в некотором улучшении переходного процесса, то рекомендуется ввести дополнительную коррекцию нелинейной характеристики НР, которая может быть выполнена по двум направлениям:

- 1) смещение влево/вправо участка "большого" коэффициента усиления без изменения степени наклона;
- 2) изменение наклона участков "малого" и "большого" коэффициентов усиления.

На рис. 6, а представлены три варианта нелинейных характеристик НР, а на рис. 6, б — переходные процессы ошибки в рассматриваемой нечеткой системе при единичном задающем воздействии. Из данных рисунков видно, что смещение участка "большого" коэффициента усиления вправо уменьшает значение перерегулирования. Необходимо отметить, что диапазон смещения участка ограничен, с одной стороны, точкой перегиба нелинейной характеристики (дальнейшее движение вправо вырождает регулятор в линейный), а с другой — границей участка насыщения.

Изменение наклона участков "малого" и "большого" коэффициентов усиления также существенным образом влияет на качество управления. Так, увеличение крутизны данных участков приводит к возрастанию перерегулирования. При этом изменение "малого" участка (рис. 7, а), очевидно влияет на переходной процесс вблизи положения равновесия (рис. 7, б) и оказывает малое влияние на начальной стадии переходного процесса, в то время как "большой" участок влияет на переходной процесс в целом (рис. 7, в и рис. 7, г).

Таким образом, в число дополнительных рекомендаций к предложенной выше методике синтеза НР можно включить следующие:

1. Для увеличения быстродействия САУ необходимо сдвинуть ФП входных терм ближе к центру или увеличить значения ФП выходных терм с учетом максимально допустимых управляющих воздействий.
2. Для уменьшения перерегулирования следует раздвинуть границы боковых ФП входных терм-множеств.

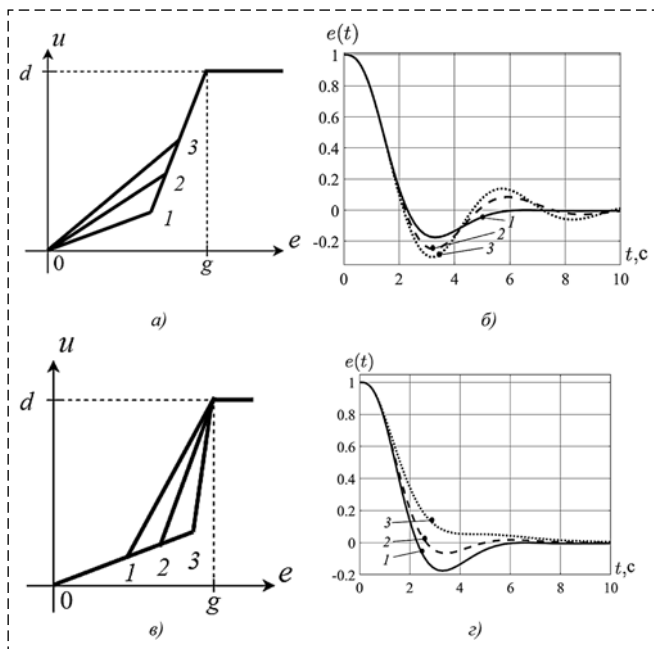


Рис. 7. Статические характеристики (а, в) и переходные процессы ошибки (б, г) при изменении наклона участка "малого" и "большого" коэффициентов усиления

Fig. 7. Static characteristics (a, v) and error transients (б, г) when the slope of the "small" and "large" gain sections changes

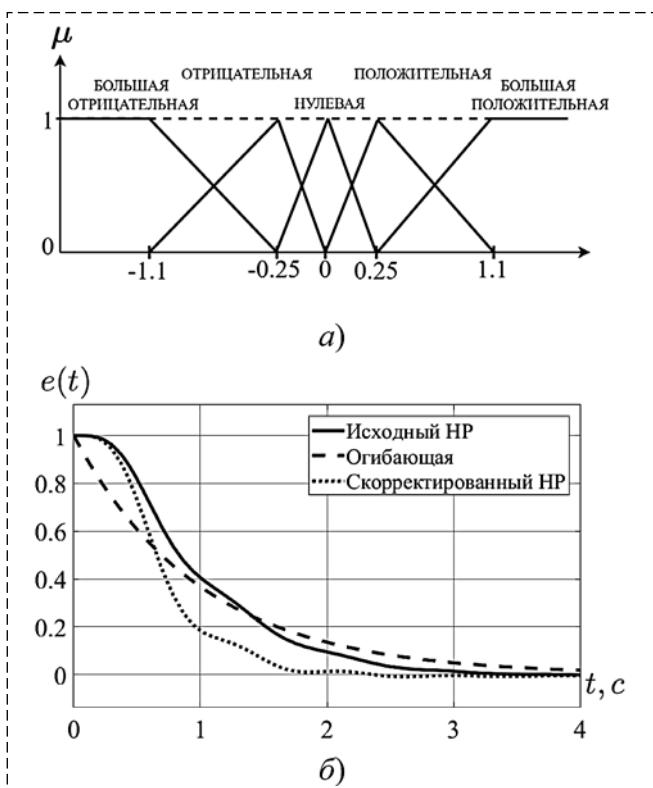


Рис. 8. Расположение ФП входных терм (а) и сравнение переходных процессов в САУ с исходным и скорректированным НР (б)

Fig. 8. The location of the MF of the input terms (a) and the comparison of transient processes in the ACS with the original and corrected FR (б)

Для рассматриваемой нечеткой САУ с астатическим объектом управления качественное улучшение переходного процесса (уменьшение времени регулирования примерно на 50 %) достигается (рис. 8, б), если сдвинуть вершины ФП входных терм "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" и "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ" ближе к центру, а также увеличить значения ФП выходных терм, активируемых правилами "Если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" ... " и "Если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ" ... ". На рис. 8, а представлено скорректированное с учетом дополнительных рекомендаций расположение ФП входных терм, а конечные продукционные правила имеют следующую структуру:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 3$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,15$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,15$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -3$.

Рассмотрим процедуры синтеза нечеткой САУ со статической линейной частью, передаточная функция которой имеет следующие параметры: $K_{\text{ЛЧ}} = 1$, $a_0 = 0,01$, $a_1 = 0,05$, $a_2 = 0,65$, $a_3 = 1,6$, $a_4 = 1$. Пусть для данной системы также задано требование по обеспечению степени устойчивости $\eta = 1$, значение которой выбрано из тех же соображений, что и для рассмотренной ранее астатической линейной части. На рис. 9 представлена процедура синтеза НР: в соответствии с круговым критерием построены $\bar{W}_{\text{ЛЧ}}(j\omega - 1)$ и касающаяся ее окружность, пересекающая действительную ось в точках -1 и $-0,45$.

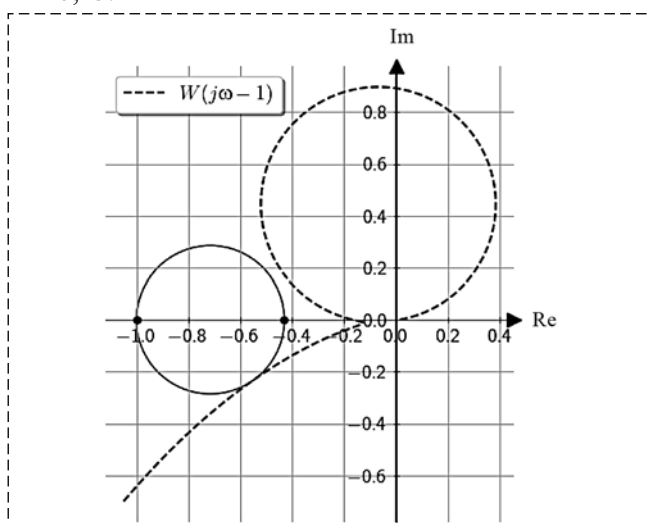


Рис. 9. Синтез НР в САУ со статической линейной частью

Fig. 9. Synthesis of FR in ACS with a static linear part

При синтезе настроек НР рассматриваем два варианта: равномерное расположение ФП входных терм и расположение с учетом дополнительных рекомендаций. Значения выходных ФП выберем из следующих соображений: так как рассматриваемая нечеткая САУ является нелинейной, то для такой системы следует рассматривать не абсолютную устойчивость положения равновесия (как это было выше), а абсолютную устойчивость процессов, причем найденные на основе кругового критерия значения $K_1 = 1$ и $K_2 = \frac{1}{0,45} = 2,2$ ограничивают значение производной нелинейной характеристики НР, т. е. $K_1 \leq \frac{du(e)}{de} \leq K_2$. Обозначив $p = 0,5$ и $q = 1$ координаты ФП входных терм "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" и "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" соответственно (в этом случае используется их равномерное расположение, как показано на рис. 2, а), можно рассчитать необходимое значение ФП выходной термы $b = pK_1 = 0,5$ для правила "Если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" ... " и значение ФП выходной термы $d = (q - p)K_2 + b = 1,6$ для правила "Если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" ... ". Итоговые продукционные правила имеют следующий вид:

- если e есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 1,39$;
- если e есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то $u = 0,4$;
- если e есть "НУЛЕВАЯ", то $u = 0$;
- если e есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -0,4$;
- если e есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то $u = -1,39$.

На рис. 10, а показана соответствующая выбранным настройкам нелинейная характеристика НР, а на рис. 10, б — переходной процесс в САУ с НР совместно с огибающей переходного процесса.

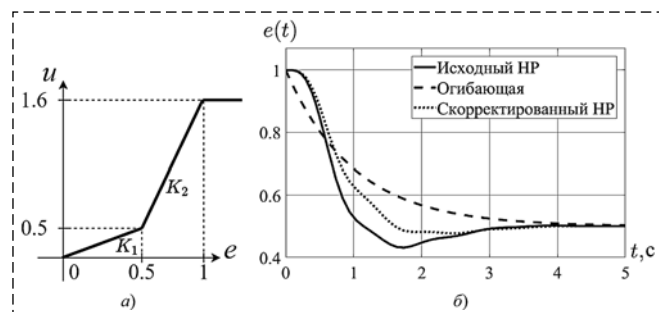


Рис. 10. Нелинейная характеристика скорректированного НР (а) и сравнение переходных процессов в САУ с исходным и скорректированным НР (б)

Fig. 10. Nonlinear characteristic of the corrected FR (a) and comparison of transient processes in the ACS with the original and modified FR (b)

Анализируя переходной процесс, несложно убедиться, что нечеткая САУ обладает требуемой степенью устойчивости, и переходной процесс $e(t)$ располагается ниже заданного значения. Если качество данного процесса не соответствует исходным требованиям, например из-за "провала" при $t = 1,5$ с, то можно рассмотреть второй вариант с привлечением дополнительных рекомендаций:

- раздвинуть ФП входных терм от центра, при этом изменив значения ФП выходных терм так, чтобы сохранить коэффициенты усиления на двух участках характеристики НР

Итоговый скорректированный переходной процесс приведен на рис. 10, б.

Заключение

Предложенная в данной статье методика синтеза параметров нечеткого регулятора, построенная на основе оценки степени устойчивости — одного из наиболее распространенных в инженерной практике косвенных показателей качества, обеспечивает в нечеткой системе заданное быстродействие. При необходимости одновременного обеспечения в нечеткой системе заданных точностных характеристик удобно использовать результаты работы [13], в которой для подстройки параметров НР, влияющих на точность, используются те же инструментальные переменные — базисные параметры НЛВ, что и для обеспечения требуемого быстродействия.

Список литературы

1. **Piegat A.** Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag Heidelberg, 2001. 728 p.
2. **Jantzen J.** Foundations of fuzzy control: a practical approach. John Wiley & Sons, 2013. 352 p.
3. **Tanaka K., Sano M.** On the concepts of regulator and observer of fuzzy control systems // Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference. 1994. Vol. 2. P. 767—772.
4. **Choi H. H., Jung J.** Discrete-time fuzzy speed regulator design for PM synchronous motor // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 60, N. 2. P. 600—607.
5. **Макаров И. М., Лохин В. М.** Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем автоматического управления. М.: Наука, 2009. 227 с.
6. **Kluska J., Żabiński T.** PID-like adaptive fuzzy controller design based on absolute stability criterion // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 28, N. 3. P. 523—533.
7. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С.** Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления // Информационные технологии. Приложение. 2013. № 2. 31 с.
8. **Шубладзе А. М.** Способы синтеза систем управления максимальной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. 1980. № 1. С. 28—37

9. Azimi S. M., Naghizadeh R. A., Kian A. R. Optimal controller design for interconnected power networks with predetermined degree of stability // *IEEE Systems Journal*. Vol. 13, N. 3. P. 3165–3175.

10. Литвинов Н. Д. Метод расположения корней характеристического полинома, обеспечивающий заданную степень устойчивости и колебательность системы // *Автоматика и телемеханика*. 1995. № 4. С. 53–61.

11. Наумов Б. Н. Теория нелинейных автоматических систем. Частотные методы. М.: Наука, 1972. 544 с.

12. Якубович В. А. Абсолютная неустойчивость нелинейных систем управления. Системы с нестационарными нелинейностями. Круговой критерий // *Автоматика и телемеханика*. 1971. № 6. С. 25–34.

13. Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 619–624.

Synthesis of a Fuzzy Controller According to the Degree of Stability of the Control System

Y. A. Bykovtsev, bykovtsev@mirea.ru,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"MIREA — Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: Bykovtsev Y. A., Graduate Student, Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA — Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: bykovtsev@mirea.ru

Accepted on February 21, 2022

Abstract

The article is devoted to solving the problem of analysis and synthesis of a control system with a fuzzy controller (fuzzy control system) in terms of the degree of stability. As interest in fuzzy control systems grows, various approaches to the study of such systems are being developed more and more actively. One of the most actively developing areas is based on the modification of methods for assessing the stability regions of nonlinear ACS, however, when solving most practical problems, this knowledge is not enough, since the developer needs to provide the required qualitative characteristics of the transient process (and, in particular, the control time). Therefore, the synthesis of fuzzy ACS in terms of the degree of stability seems to be quite constructive, since it allows quite accurately assessing the performance of a fuzzy ACS. The proposed solution is based on the criterion of absolute stability for a system with an approximated nonlinear characteristic of a fuzzy controller, which can be obtained directly on the basis of the Sugeno method. The article develops Yakubovich's circular criterion of absolute stability, modified for a fuzzy control system, using a shifted AFC of the linear part. With this approach, it is possible to obtain a completely constructive solution to the problem of synthesizing the parameters of a fuzzy controller in the frequency domain. On the example of fuzzy control systems with static and astatic linear parts, the features of the application of the developed approach are shown and methods for synthesizing the parameters of a fuzzy controller are proposed. The analysis of the influence of individual components of the nonlinear transformation on the quality of the transient process is carried out, and on the basis of this a number of practical recommendations are given for correcting the fuzzy controller settings that provide the required performance.

Keywords: degree of stability, fuzzy controller, absolute stability, circular criterion, Sugeno fuzzy model

For citation:

Bykovtsev Y. A. Synthesis of a Fuzzy Controller According to the Degree of Stability of the Control System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 6, pp. 295–301.

DOI: 10.17587/mau.23.295-301

References

1. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control, Physica-Verlag Heidelberg, 2001, 728 p.

2. Jantzen J. Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach, John Wiley & Sons, 2013, 352 p.

3. Tanaka K., Sano M. On the concepts of regulator and observer of fuzzy control systems, *Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference*, 1994, vol. 2, pp. 767–772.

4. Choi H. H., Jung J. Discrete-time fuzzy speed regulator design for PM synchronous motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 600–607.

5. Makarov I. M., Lokhin V. M. Synthesis automation and training of intelligent automatic control systems, Moscow, Nauka, 2009, 227 p. (in Russian).

6. Kluska J., Żabiński T. PID-like adaptive fuzzy controller design based on absolute stability criterion, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 523–533.

7. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S. Stability of intelligent automatic control systems, *Informacionnye tekhnologii. Prilozhenie*, 2013, no. 2, 31 p. (in Russian).

8. Shubladze A. M. Methods for the synthesis of control systems are approaching the degree of stability, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1980, no. 1, pp. 28–37 (in Russian).

9. Azimi S. M., Naghizadeh R. A., Kian A. R. Optimal controller design for interconnected power networks with predetermined degree of stability, *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3165–3175.

10. Litvinov N. D. The method of location of the roots of the characteristic polynomial, which provides the given degree of stability and oscillation of the system, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1995, no. 4, pp. 53–61 (in Russian).

11. Naumov B. N. Theory of nonlinear automatic systems. Frequency methods, Moscow, Nauka, 1972, 544 p. (in Russian).

12. Yakubovich V. A. Absolute instability of nonlinear control systems. Systems with nonstationary nonlinearities. Circular criterion, *Avtomatika i Telemekhanika*, 1971, no. 6, pp. 25–34.

13. Bykovtsev Y. A., Lokhin V. M. Estimation of the Accuracy of a Control System with a Fuzzy PID Controller Based on the Approximation of the Static Characteristic of the Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 12, pp. 619–624.