

УДК 681.518

Применение адаптивной настройки пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора для управления антенной радиолокатора

Иванченко А. Я.

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева

КАИ, К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия

e-mail: alesiaiwn@mail.ru

Аннотация

Задача заключается в разработке адаптивной системы управления антенной радиолокационной станцией на базе классического пропорционально – интегрально – дифференциального (ПИД) регулятора с применением таких современных технологий управления, как нечёткое управление. Необходимость адаптивной настройки возникла в связи с тем, что классический регулятор обладает высокой чувствительностью к возмущениям входного сигнала, необходимостью ручной настройки параметров регулятора и, в связи с этим, необходимостью частой перенастройки регуляторов, а также невозможностью обеспечения оптимальных характеристик регулятора для процессов с нелинейностями или изменяющимися с течением времени параметрами.

Ключевые слова

система управления, управление антенной радиолокатора, адаптивная настройка регулятора, ПИД регулятор, адаптивная настройка ПИД регулятора, управление антенной РЛС, адаптивная система управления

Введение

В своей речи от 14 июня 2012 года, президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин заявил: «В ближайшие пять лет должен быть реализован проект дальнего радиолокационного обнаружения А-100». Системы дальнего радиолокационного обнаружения и управления расположенные на летательном аппарате (чаще всего это самолёт) называют авиационными комплексами радиообнаружения и наведения (в

англоязычной литературе «Авиационная система раннего предупреждения и управления»), и необходимы для осуществления обнаружения объектов. Подобные системы предназначены для разведки и управления воздушным боем, однако могут быть использованы и для управления гражданским воздушным движением.

При повышении требований к авиационным комплексам радиообнаружения и наведения, повышаются требования и к наземным системам обнаружения и наведения, коими являются радиолокационные станции (РЛС). Антенна радиолокатора (антенна РЛС), систему управления которой предлагается разрабатывать, расположена в боевом положении на крыше фургона. Для обеспечения высокой точности наведения при определении дальности, скорости и геометрических параметров воздушных, морских и наземных объектов необходимо реализовать вращение антенны по азимуту с достаточно большими угловыми скоростями, а для этого систему управления антенной РЛС предлагается сделать адаптивной.

Анализ принципов построения традиционных систем управления антенной радиолокатора показал, что они имеют ряд недостатков. Среди них можно выделить такие как: не выполнение условий согласования, когда точки приложения возмущения и управления не совпадают; неполнота информации о векторе состояния системы, когда управление осуществляется по измеряемым выходным координатам системы; использование блока идентификации динамики объектов управления, особенно для систем высокого порядка, существенно усложняет структуру системы управления. При этом точность идентификации зависит от внешних воздействий, что усложняет задачу регулирования и в некоторых случаях может приводить к потере устойчивости. Потому, для управления антенной радиолокатора предлагается применять адаптивный (самонастраиваемый) ПИД регулятор. Адаптивная настройка будет осуществляться за счёт нечёткого регулирования параметрами усиления классического ПИД регулятора в зависимости от изменяющихся условий. Кроме того нечёткий регулятор сможет обеспечить помехозащищённость, что важно для антенн РЛС, так как помехи могут стать причиной получения неточного сигнала.

Постановка задачи

Необходимо разработать алгоритмы и программы анализа и синтеза системы управления поворотом нежесткой антенны РЛС. Антенна радиолокатора имеет следующие

характеристики: $A = 1400\text{мм}$; $B = 1200\text{мм}$; $h = 130\text{мм}$; $l_1 = 600\text{мм}$; $l_2 = l_3 = 400\text{мм}$. Разрабатываемая система должна обеспечить высокую максимальную скорость поворота антенны (высокое быстродействие системы), а перерегулирование – необходимо осуществлять автоматически за счёт самонастройки системы, т.е. фактически, перерегулирование не должно занимать времени вообще.

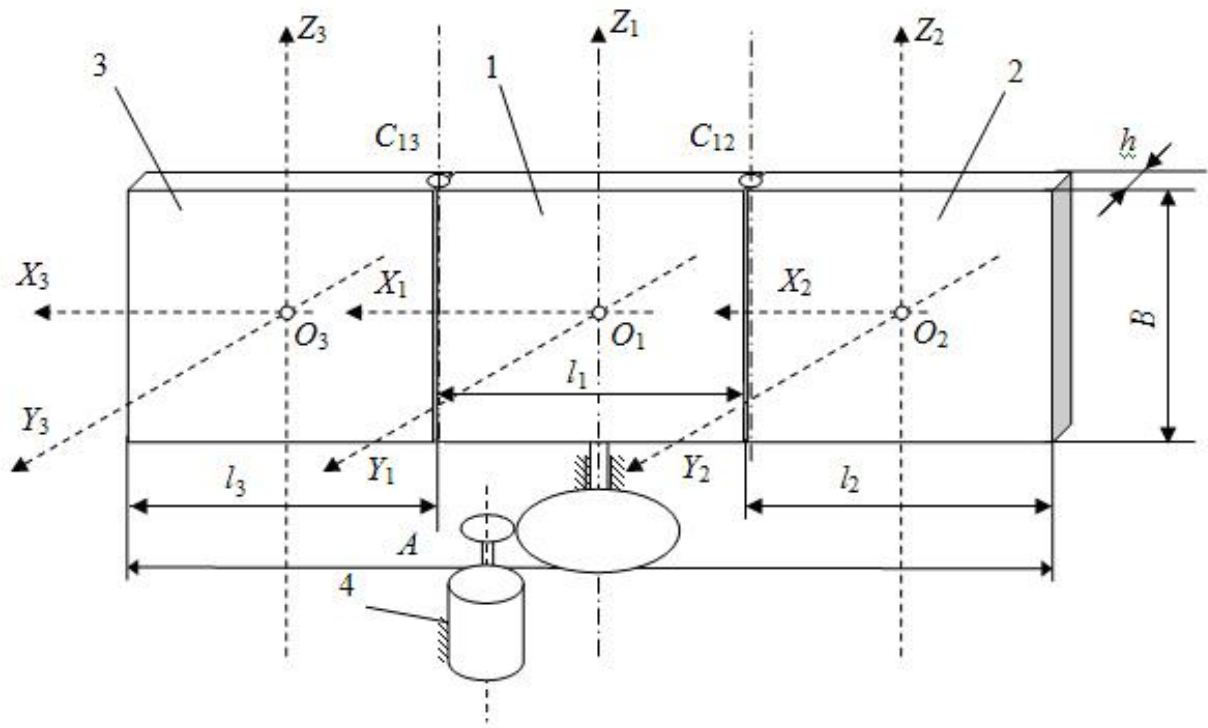


Рисунок 1.

Жёсткость упругого элемента определяется в соответствии с собственной частотой колебаний, равной 2 Гц, а создание модели управляемого согласующего устройства осуществляется посредством применения пакета прикладных программ MatLab, а также некоторых его специальных инструментов (Control Systems Toolbox, Robust Control Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox).

Уравнения движения антенны

Для разработки системы автоматического управления антенной радиолокатора, как объекта управления, необходимо произвести расчёт математической модели антенны РЛС. При этом задать математическую модель можно двумя способами:

- 1) посредством одного уравнения n -го порядка — основан на уравнениях Лагранжа второго рода аналитической механики и второй закон Кирхгофа теоретических основ электротехники;

2) посредством системы n -уравнений первого порядка в форме Коши или, описание уравнениями пространства состояний. Основу этого способа в России заложила докторская диссертация А.М. Ляпунова 1892 года.

После изучения имеющихся способов задания математической модели, для данного объекта управления был выбран первый способ, где абстрактная математическая модель в форме вход-выход (с одинаковым числом входов и выходов) может быть представлена следующим символьным описанием объекта, являющимся единой формой описания стационарных линейных, нестационарных линейных и нелинейных объектов управления с сосредоточенными и распределёнными параметрами:

$$z^{(k)} + \sum_{i=1}^k [\alpha_i(v, t)]_{(*)} z^{(k-i)} = \sum_{j=1}^k [\beta_j(v, t)]_{(*)} u^{(k-j)}, \quad (1)$$

где $z \in R^m$, $u \in R^m$, z — вектор выхода; u — вектор входа; k — некоторое заданное положительное число; $[\alpha_i(v, t)]_{(*)}$, $[\beta_j(v, t)]_{(*)}$ — заданные в символьном виде функциональные матрицы соответствующих размеров (см. [4]), индекс (*) представляет номер уравнения, которое задает область изменения аргументов уравнения (1).

В роли этих аргументов выступают время t и n -мерный вектор v , подчиненный некоторому заданному уравнению (*). Таким образом, область изменения аргументов функциональных матриц задаётся посредством некоторого уравнения (*). Тем самым, абстрактная математическая модель, в отличие от общепринятых задаётся не одним, а двумя уравнениями.

Нетрудно видеть, что степень многочлена правой части (1) может быть меньше k , но при этом соответствующие матрицы $[\beta_j(v, t)]_{(*)}$ следует полагать нулевыми. Аналогично, в случае, когда размерности векторов входа и выхода не совпадают, нулевыми следует полагать соответствующие элементы матриц $[\alpha_i(v, t)]_{(*)}$, $[\beta_j(v, t)]_{(*)}$.

Кинематическая схема модели антенны состоит из трех однородных по плотности прямоугольных пластин 1, 2, 3 средняя из которых жестко закреплена на валу привода, а две другие, связаны со средней, через упругий элемент с жесткостью c , массой m и размером $A \times B \times h$ (рисунок 1). Жесткость упругого элемента определяется в соответствии с собственной частотой колебаний, равной 2Гц.

Рассматриваемая система имеет три степени свободы, которые определяются независимыми обобщенными координатами φ_1 , φ_2 , φ_3 , измеряемыми в неподвижной (инерциальной) системе координат $O_1X_0Y_0Z_0$ (рисунок 2).

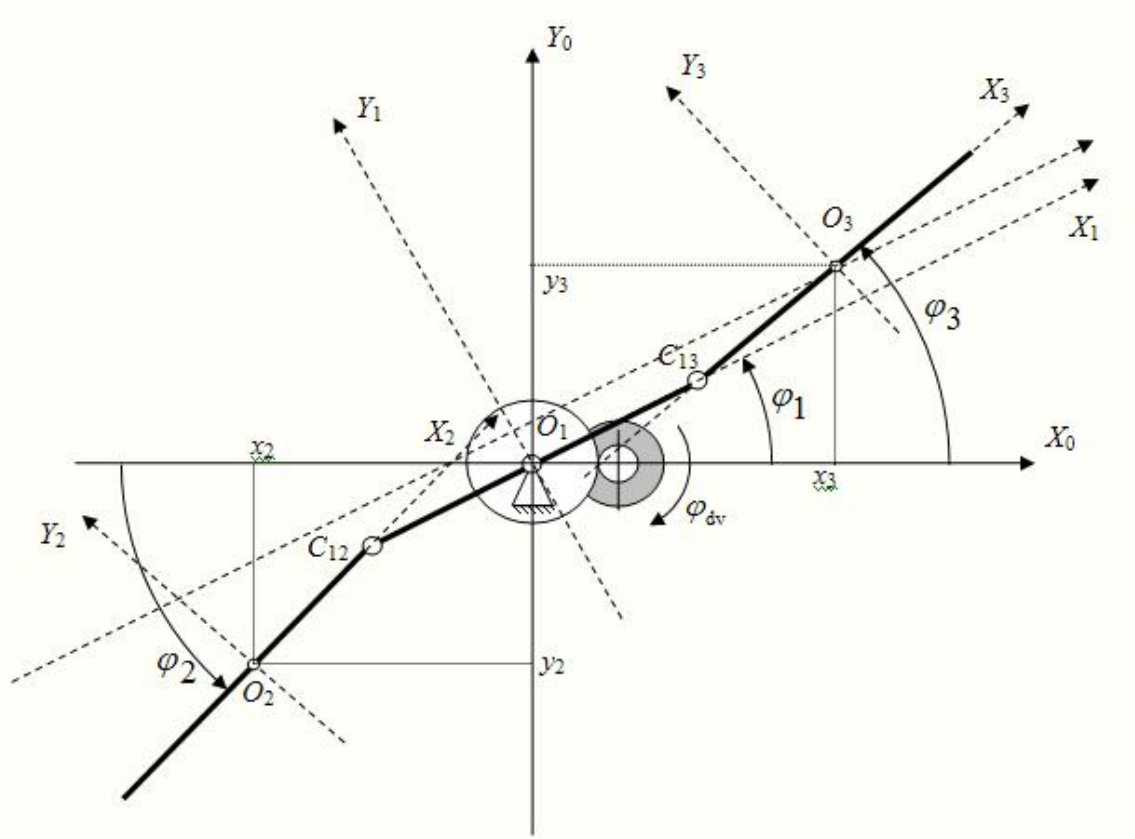


Рисунок 2.

В рассматриваемой системе имеется несколько видов силовых воздействий:

1. момент, действующий относительно оси Z_1 со стороны двигателя с редуктором M_{dv} ;
2. момент сухого и вязкого трения в опорах подвеса антенны по оси $Z_1 - M_{st}$;
3. моменты в шарнирах C_{12} и C_{13} , обусловленные силами упругости, обладающими потенциальной энергией:

$$\Pi = \frac{1}{2} c(\varphi_2 - \varphi_1)^2 + \frac{1}{2} c(\varphi_3 - \varphi_1)^2; \quad (2)$$

4. демпфирующие силы и моменты, обусловленные действием скоростного напора воздуха при движении системы.

С учётом (2) и других действующих на систему силовых воздействий было получено выражение обобщённых сил системы управления антенной:

$$Q_j = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + M_{dv} \frac{\partial \varphi_1}{\partial q_j} - M_c \frac{\partial \varphi_1}{\partial q_j} + b_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial q_j} + b_K \frac{\partial \varphi_2}{\partial q_j} + b_K \frac{\partial \varphi_3}{\partial q_j}, \quad (3)$$

где $j = 1, 2, 3$; b_1 - силы, действующие на центральную пластину антенны; b_K - силы, действующие на боковые пластины антенны. При этом стоит подчеркнуть, что момент

сопротивления включает в себя, в том числе и момент сухого и вязкого трения, поэтому в дальнейших расчётах отдельно обозначаться не будет.

С учетом вышеприведённых расчётов, на основе уравнения Лагранжа 2-ого рода (4):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{\Sigma}}{\partial \dot{\varphi}_j} \right) - \frac{\partial T_{\Sigma}}{\partial \varphi_j} = \frac{\delta A_j}{\delta \varphi} = Q_j, \quad (4)$$

было получено уравнение движения антенны радиолокатора в виде (5):

$$\begin{cases} \left[J_1 + J_{dv} i^2 + J_{red} + \frac{1}{2} m_K l_1^2 \right] \times \ddot{\varphi}_1 + \frac{1}{4} m_K l_1 R \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \times \ddot{\varphi}_2 + \\ + \frac{1}{4} m_K l_1 R \cos(\varphi_3 - \varphi_1) \times \ddot{\varphi}_3 = c(\varphi_2 - \varphi_1) + c(\varphi_3 - \varphi_1) + M_{dvi} - M_c - b_1 \dot{\varphi}_1 \\ \left[J_2 + \frac{1}{4} m_K R^2 \right] \times \ddot{\varphi}_2 + \frac{1}{4} m_K l_1 R \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \times \ddot{\varphi}_1 = -c(\varphi_2 - \varphi_1) - b_K \dot{\varphi}_2 \\ \left[J_3 + \frac{1}{4} m_K R^2 \right] \times \ddot{\varphi}_3 + \frac{1}{4} m_K l_1 R \cos(\varphi_3 - \varphi_1) \times \ddot{\varphi}_1 = -c(\varphi_3 - \varphi_1) - b_K \dot{\varphi}_3 \end{cases} \quad (5)$$

Синтез регулятора

Проанализировав исходные характеристики системы, было установлено, что замкнутая система является неустойчивой, что видно из логарифмической амплитудно-частотной характеристики (рисунок 3), где частота среза ω_{cp} лежит правее частоты ω_{π} , при которой угол фазового сдвига $\varphi(\omega_{\pi}) = -180^{\circ}$, т.е. годограф амплитудно-фазовой характеристики на комплексной плоскости охватывает критическую точку с координатами $(-1; j0)$.

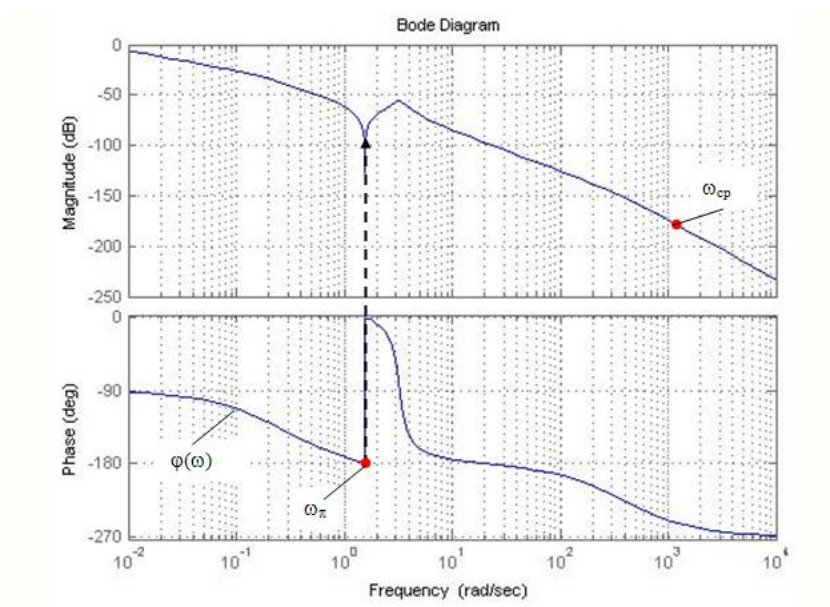


Рисунок 3.

После включения в систему пропорционально – интегрально – дифференциального регулятора, удалось добиться устойчивости системы, что видно из рисунка 4.

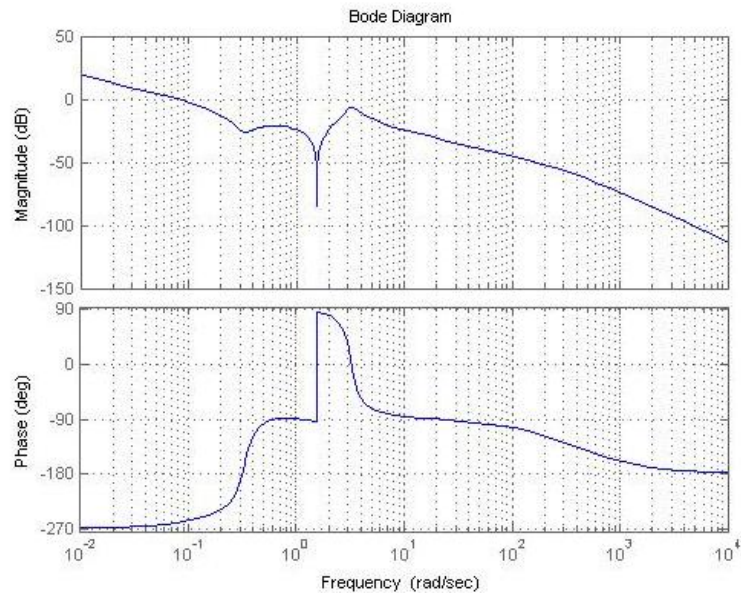


Рисунок 4.

Проблема применения традиционного для таких систем ПИД регулятора заключается в том, что для подбора коэффициентов усиления обеспечивающих устойчивость системы, пришлось потратить много времени и, даже полученный результат, не удовлетворяет всем выставленным требованиям. Так время регулирования системы управления с классическим ПИД регулятором составляет около 2 секунд. Кроме того, в полученной системе очень велики колебания по углу и по скорости для боковых пластин антенны, что может сказаться на работе радиолокатора, потому предлагается осуществлять подстройку параметров ПИД регулятора нечётким регулятором.

Нечёткое регулирование параметров ПИД регулятора

Анализ принципов построения традиционных систем управления антенной РЛС базируется на классическом ПИД регуляторе. Однако из выше представленного материала видно, что он имеет ряд недостатков. Для управления антенной радиолокатора предлагается применить ПИД регулятор, коэффициенты усиления которого будут настраиваться при помощи нечёткого регулятора, т.е. основной функцией нечёткого регулятора будет автоматическая подстройка параметров усиления классического ПИД регулятора в зависимости от изменяющихся условий. Кроме того, нечёткий регулятор сможет обеспечить помехозащищённость, что важно для антенн РЛС.

Подстройка параметров ПИД регулятора может быть выполнена с помощью блока нечеткой логики (рисунок 5). Блок нечеткой логики (фаззи-блок) использует базу правил

подстройки и методы нечеткого вывода. Фаззи-подстройка позволяет уменьшить перерегулирование, снизить время установления и повысить робастность ПИД-регулятора [8].

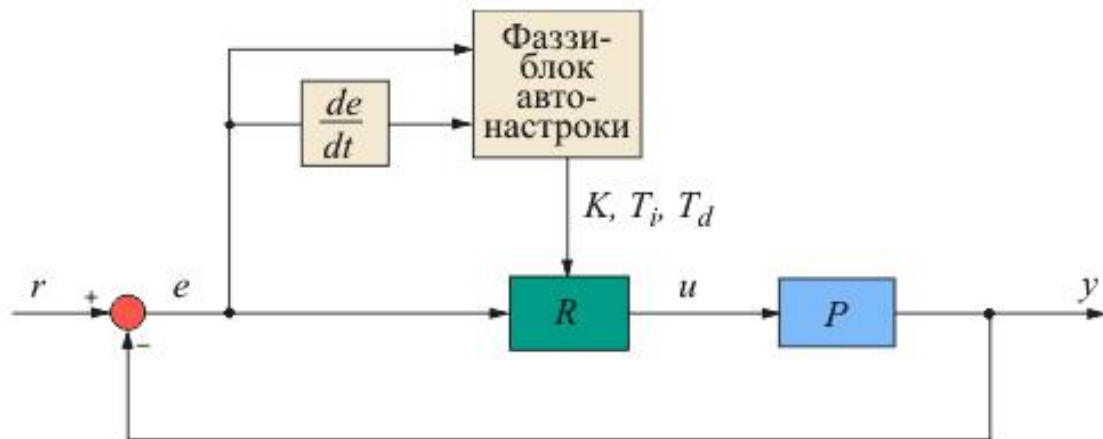


Рисунок 5.

Процесс автонастройки регулятора с помощью блока нечеткой логики начинается с поиска начальных приближений коэффициентов регулятора. Это делается обычно методом Зиглера-Никольса, исходя из периода собственных колебаний в замкнутой системе и петлевого усиления. Далее формулируется критериальная функция, необходимая для поиска оптимальных значений параметров настройки методами оптимизации.

Настройки регулятора осуществляется в несколько шагов [9]. Сначала выбирают диапазоны входных и выходных сигналов блока автонастройки, форму функций принадлежности искомым параметрам, правила нечеткого вывода, механизм логического вывода, метод дефаззификации и диапазоны масштабных множителей, необходимых для пересчета четких переменных в нечеткие.

Поиск параметров регулятора выполняется методами оптимизации. Для этого выбирается целевая функция как интеграл от суммы квадратов ошибки регулирования и времени установления. В критерий минимизации иногда добавляют скорость нарастания выходной переменной объекта.

В качестве искомым параметров (параметров, которые надо найти) выбирают положение максимумов функций принадлежности (рисунок 6) и масштабные коэффициенты на входе и выходе фаззи-блока. К задаче оптимизации добавляют ограничения на диапазон изменения позиций функций принадлежности. Оптимизация критериальной функции может быть выполнена, например, с помощью генетических алгоритмов.

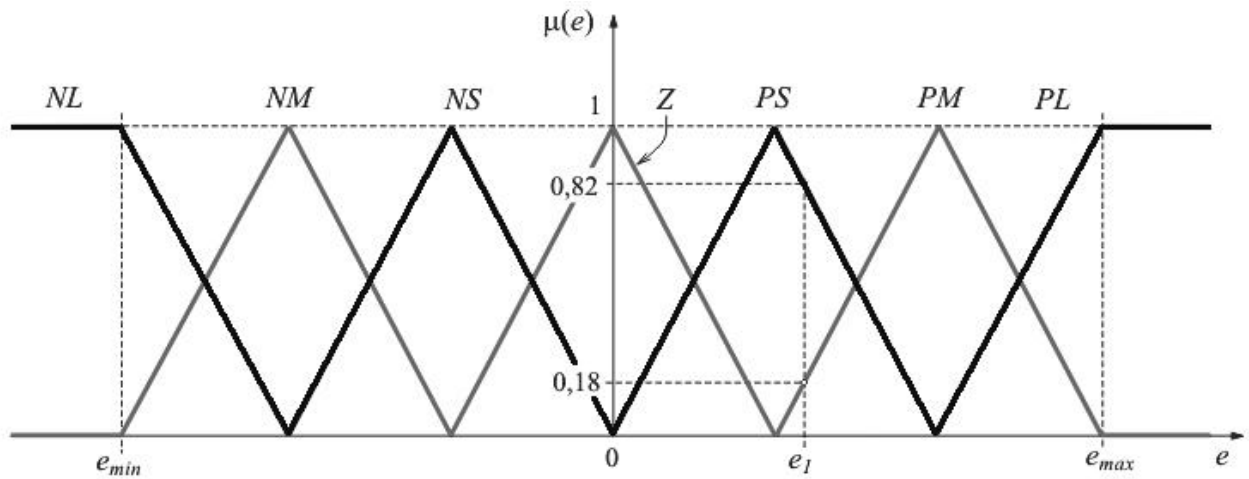


Рисунок 6.

Если величина ошибки e на входе нечеткого регулятора (рисунок 5) равна e_1 (см. рисунок 6), то соответствующее значение нечеткой переменной будет равно PS со степенью принадлежности подмножеству PS , равной $\mu(e_1)=0.82$, или равно PM со степенью принадлежности $\mu(e_1)=0.18$. Степень принадлежности ошибки e_1 другим множествам (Z, PL, NS и др.) равна нулю. Таким образом, величина ошибки e_1 оказалась преобразованной в нечеткие переменные.

Нечеткий логический контроллер воспринимает информацию с двух входов (по ошибке и по производной ошибки) системы. На выходе нечеткого регулятора осуществляется настройка коэффициентов усиления K_p, K_i и K_d ПИД регулятора. Рисунок 7 показывает моделирование нечеткого регулятора, а рисунок 8 - Simulink блок нечеткого ПИД регулятора.

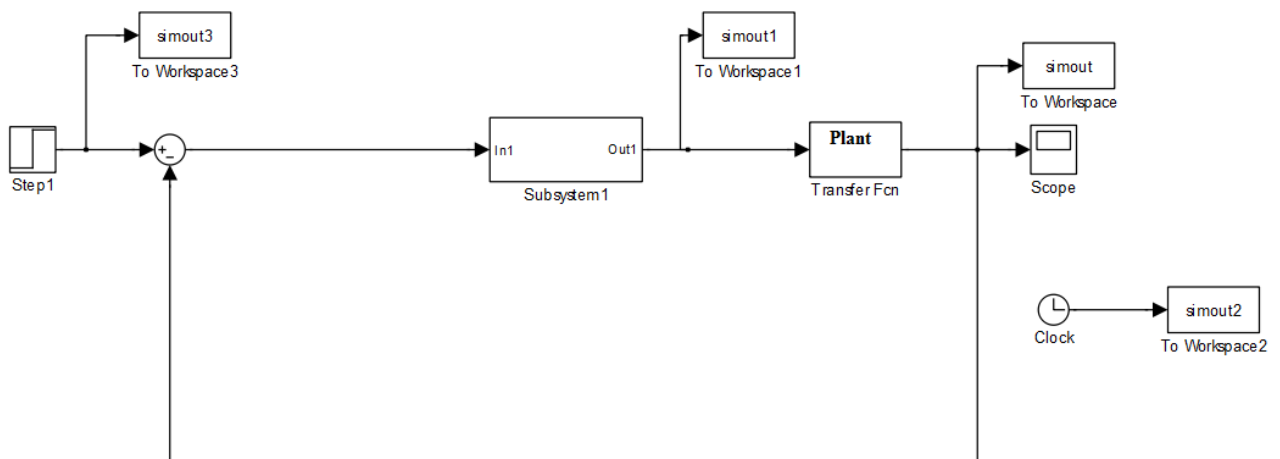


Рисунок 7

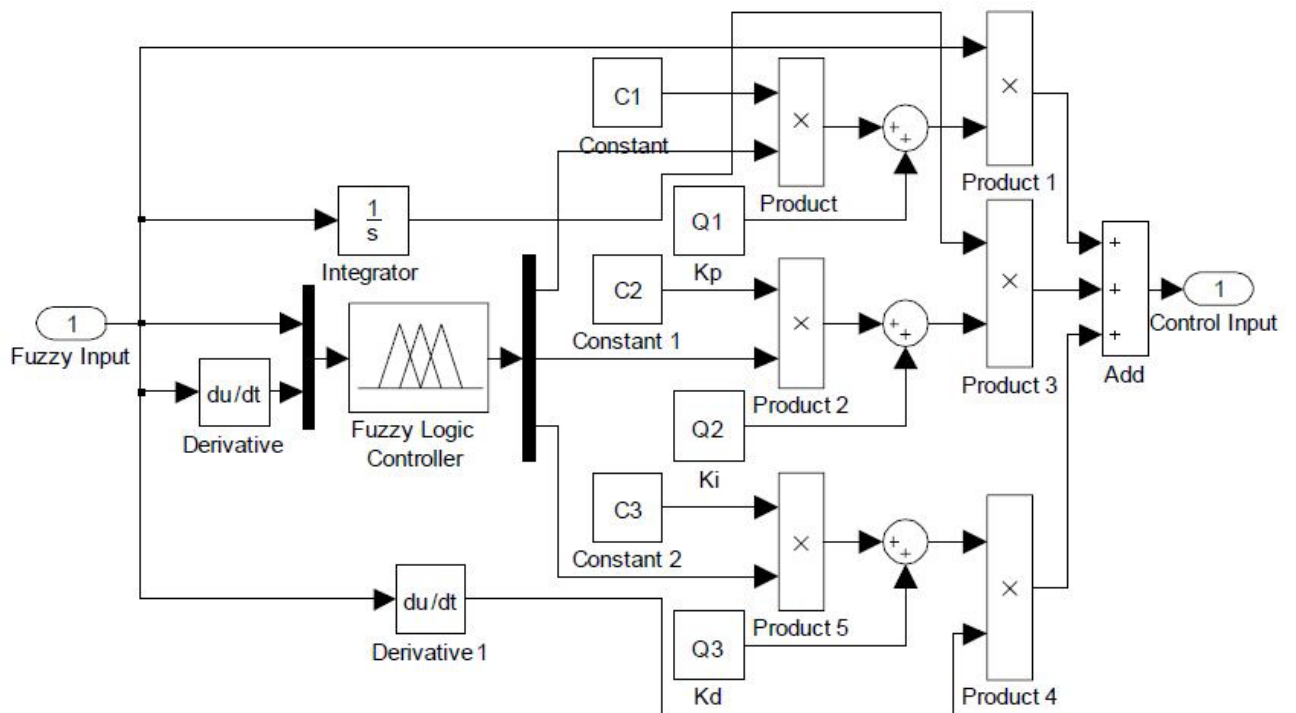


Рисунок 8

Применение нечеткого регулятора позволяет автоматически регулировать параметры усиления K_p , K_i и K_d ПИД регулятора. При этом происходит изменение передаточной функции объект управления (ОУ).

Результаты моделирования показывают, что реакция адаптивного нечеткого ПИД регулятора сравнительно лучше, чем классического ПИД регулятора. Также было замечено, что с увеличением порядка объекта управления, реакция ПИД регулятора становится скуднее. Хотя реакция адаптивного нечеткого ПИД регулятора является сравнительно лучше. Также мы видим, что адаптивный нечеткий ПИД регулятор дает превосходные результаты для объекта управления 2-го и 3-го порядка, по сравнению с другими высшими объектами управления. Данные эксперименты, дают основания полагать, что применение адаптивного нечёткого регулятора для управления антенной радиолокатор приведет к положительным результатам.

Список использованных источников

1. Арановский С.В., Бобцов А.А., Кремлев А.С., Лукьянова Г.В. Идентификация частоты синусоидального возмущения, действующего на линейный объект // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2007.- N 1 –С.22-25.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления/ Изд.4-е, перераб. и доп., 2003.- 752 с.
3. Бойчук Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления, 1971. – 112 с.
4. Бутенин Н.В. Введение в аналитическую механику./ М.: Наука, 1971. – 264 с.
5. Ротхаммель К. Антенны./- С-Пб.БОЯНЫЧ, 1998.- 656 с.
6. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. / СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
7. Подчукаев В. А. Аналитические методы теории автоматического управления. - М.: Физматлит, 2002 -256 с.
8. Рутковская Д, Пилиньский М. Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 1006, 383 с.
9. Silva G.J., Datta A., Bhattacharyya S.R. PID Controllers for Time-Delay Systems. Birkhauser Boston, 2005.- 251 с.
10. Yesil E.; Guzelkaya M.; Eksin I. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of pid controllers. - World Automation Congress, 2004. Proceedings. Vol. 17, 28 June - 1 July 2004, p.501 - 506.
11. Hsuan -Ming Feng. A self-tuning fuzzy control system design. - IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th. Vol. 1, 25-28 July 2001, p. 209 - 214 vol.1.
12. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu., Gosine R.G. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures. - IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, vol. 29, Issue 3, Jun 1999, p. 371 - 388.