

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

**А.Ю. Лабинский, кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.**

П.Н. Афонин, доктор технических наук, профессор.

**Санкт-Петербургский им. В.Б. Бобкова
филиал Российской таможенной академии**

Рассмотрено использование нейронной сети в составе системы автоматического управления, использующей ПИД-регулятор. Разработана компьютерная модель системы автоматического управления, содержащая систему охлаждения, ПИД-регулятор и искусственную нейронную сеть. Компьютерная модель реализована в виде программы на ЭВМ.

Ключевые слова: автоматическая система управления, ПИД-регулятор, искусственная нейронная сеть, компьютерная программа, математическая модель

THE PROBLEM OF USE THE NEURAL NETWORKS FOR THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

A.Yu. Labinskiy. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.

P.N. Afonin. Saint-Petersburg branch named after V.B. Bobkov of Russian customs academy

This article presents the problem of use the neural networks for the automatic control system with PID-control. The automatic control system to realize in form the mathematical model and computing program.

Keywords: automatic control system, PID-control, synthetic neural networks, computing program, mathematical model

Управление, осуществляемое без участия человека, называется автоматическим, а техническое устройство управления называется автоматическим управляющим устройством (АУУ) или контроллером. Объект управления и АУУ образуют систему автоматического управления (САУ) [1].

Цель управления – формирование управляющего воздействия АУУ на объект управления $\mu(t)$ таким образом, чтобы управляемая величина $Y(t)$, получаемая на выходе объекта управления, менялась в соответствии с изменением величины $X(t)$, подаваемой на вход АУУ: $Y(t)=X(t)$ [1]. Между изменением управляющего воздействия $\mu(t)$ и изменением величины $Y(t)$ должно существовать однозначное соответствие, которое выражается в виде математической модели объекта и используется для создания алгоритма управления.

В реальных САУ цель управления не достигается точно и вводится показатель точности функционирования САУ, который определяет отклонение управляемой величины от заданного значения (ошибка управления, сигнал рассогласования): $\varepsilon(t)=X(t)-Y(t)$.

САУ, обеспечивающая в заданных условиях наименьшее значение ошибки управления, называется оптимальной. Возникновение ошибки управления вызвано следующими причинами [1]:

- инерцией и запаздыванием реакции $Y(t)$ на $\mu(t)$;
- неточностью математической модели объекта;
- несовершенством алгоритмов управления;
- возможностью появления неустойчивых режимов работы САУ;

– неполнотой информации о текущем состоянии управляемого объекта.

Таким образом, в силу указанных причин работа САУ не может быть абсолютно точной. В процессе работы САУ всегда существует некоторое отклонение управляемой величины от заданного значения. В связи с этим в теории автоматического управления вводится понятие качества процесса управления (регулирования), вызванного типовым воздействием на систему, под которым обычно понимается ступенчатое воздействие [1].

Качество процесса управления определяется следующими показателями [2]:

- максимальное отклонение в динамике управляемой величины и её установившееся отклонение в статике после окончания переходного процесса;
- длительность процесса управления, под которым понимается время, в течение которого отклонение управляемой величины войдет в достаточно узкий коридор значений;
- колебательность процесса (декремент затухания).

Качество процесса управления считается тем выше, чем меньше значения указанных показателей. Переходный процесс управления представлен на рис. 1.

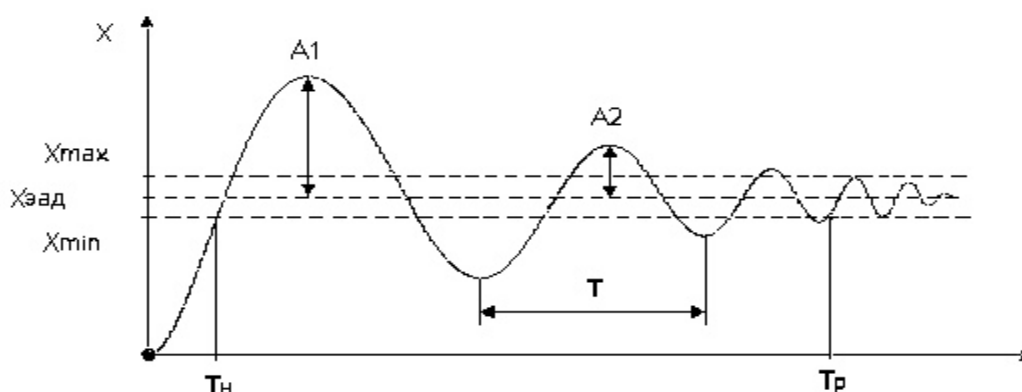


Рис. 1. Переходный процесс управления

Здесь $X_{зад}$ – заданное (желаемое) значение выходной переменной; X_{max} – верхний допустимый предел выходной переменной; X_{min} – нижний допустимый предел выходной переменной; T – период колебаний; T_n – время нарастания; T_p – время переходного процесса; A_1 – первое перерегулирование; A_2 – второе перерегулирование; $d=A_1/A_2$ – степень (декремент) затухания переходного процесса (отношение первого перерегулирования ко второму).

Представленные на рис. 1 характеристики переходного процесса, такие как перерегулирование, время нарастания, время переходного процесса, степень затухания характеризуют качество регулирования.

Если регулирующее воздействие $\mu(t)$ пропорционально ошибке управления $\varepsilon(t)$, то такой алгоритм управления называется пропорциональным (П-алгоритм, П-регулятор) и может быть описан следующей формулой [1]:

$$\mu(t)=K_p*\varepsilon(t),$$

где K_p – коэффициент передачи контроллера.

Если регулирующее воздействие $\mu(t)$ пропорционально взвешенной сумме ошибки управления $\varepsilon(t)$ и интеграла отклонения, то такой алгоритм управления называется пропорционально-интегральным (ПИ-алгоритм, ПИ-регулятор) и может быть описан следующей формулой [1]:

$$\mu(t)=K_p*[\varepsilon(t)+(1/T_i)*\int_0^t \varepsilon(t) dt],$$

где T_i – постоянная интегрирования.

Если регулирующее воздействие $\mu(t)$ пропорционально ошибке управления $\varepsilon(t)$, скорости изменения ошибки управления и ускорению отклонения регулируемой величины, то такой алгоритм управления называется пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД-алгоритм, ПИД-регулятор) и может быть описан следующей формулой [1]:

$$\mu(t) = K_p * [\varepsilon(t) + (1/T_i) * \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d * d\varepsilon(t)/dt],$$

где T_d – постоянная дифференцирования.

Особенности ПИД-регулятора

ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе – интеграл сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования.

Пропорциональная составляющая вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. При использовании только пропорционального регулятора значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении, так как существует статическая ошибка, стабилизирующая выходную величину на значении, отличном от заданного. Чем больше коэффициент пропорциональности между входным и выходным сигналом (коэффициент усиления), тем меньше статическая ошибка. Однако при слишком большом коэффициенте усиления и наличии задержек (запаздывания) в управлении в системе могут начаться автоколебания, а при дальнейшем увеличении коэффициента усиления система может потерять устойчивость.

Интегрирующая составляющая, пропорциональная интегралу по времени от отклонения регулируемой величины, используется для устранения статической ошибки. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку. Однако интегрирующая составляющая при неправильном выборе её коэффициента может приводить к автоколебаниям.

Дифференцирующая составляющая пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины и используется для противодействия прогнозируемым отклонениям от целевого значения, которые могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

Назначение ПИД-регулятора – в поддержании заданного значения X_0 некоторой величины X с помощью изменения другой величины U . Значение X_0 называется заданным значением, а разность $E = (X_0 - X)$ – ошибкой регулирования, рассогласованием или ошибкой управления. Схема ПИД-регулятора представлена на рис. 2.

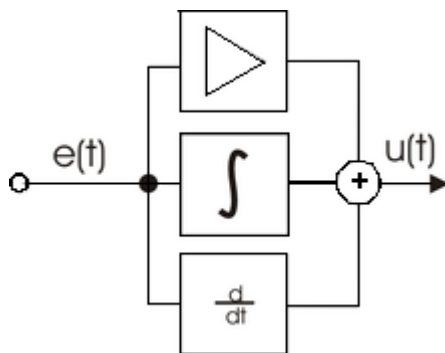


Рис. 2. Схема ПИД-регулятора

В случае линейности и стационарности САУ справедливы формулы, описывающие алгоритм управления ПИД-регулятора, представленные ниже [3].

Выходной сигнал регулятора и определяется тремя слагаемыми:

$$U(t)=P+I+D=K_p * e(t)+K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d * de/dt,$$

где K_p , K_i , K_d – коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно.

Для дискретной реализации метода расчета выходного сигнала уравнение алгоритма управления ПИД-регулятора принимает следующую форму:

$$U(n)=K_p * E(n)+K_i * \sum_{k=0}^n E(k)+K_d * [E(n)-E(n-1)], \quad K_d=K_p * K_i / T,$$

где T – время дискретизации.

В программной реализации алгоритма управления ПИД-регулятора для оптимизации расчетов можно использовать рекуррентную формулу:

$$U(n)=U(n-1)+K_p * [E(n)-E(n-1)]+K_i * E(n)+K_d * [E(n)-2 * E(n-1)+E(n-2)],$$

где E – ошибка регулирования (x_0-x).

Рекуррентная формула может быть записана также в следующем виде:

$$U(t_k)=U(t_{k-1})+K_p * [(1+\Delta t/T_i+T_d/\Delta t) * E(t_k)+(-1-2 * T_d/\Delta t) * E(t_{k-1})+T_d/\Delta t * E(t_{k-2})],$$

где $dE(t_k)/dt=[E(t_k)-E(t_{k-1})]/\Delta t$; $T_i=K_p/K_i$; $T_d=K_d/K_p$.

Алгоритм управления ПИД-регулятора в конечных разностях имеет следующий вид:

$$U(t)=P(t)+I(t)+D(t);$$

$$P(t)=C_p * E(t);$$

$$I(t)=I(t-T)+C_i * E(t);$$

$$D(t)=C_d * [E(t)-E(t-T)].$$

Основная сложность практического применения ПИД-регулятора – незнание характеристик объекта управления. Кроме того, существенную проблему представляют нелинейность и нестационарность системы. Практические регуляторы работают в ограниченном сверху и снизу диапазоне, поэтому в принципе нелинейны. В этой связи получили распространение методы экспериментальной настройки регулятора, подключенного к объекту управления.

Для конкретных объектов управления необходима дополнительная настройка ПИД-регулятора, которая заключается в подборе параметров регулятора (значений коэффициентов K_p , K_i , K_d). Дополнительная настройка параметров ПИД-регулятора является достаточно сложным процессом, так как необходимо подобрать как величину коэффициентов, отвечающих за пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие регулятора, так и соотношение между значениями указанных коэффициентов.

Моделирование системы автоматического управления

Цель моделирования – автоматизированный подбор параметров ПИД-регулятора с помощью искусственной нейронной сети. В целях подбора параметров ПИД-регулятора была создана трехслойная искусственная нейронная сеть прямого распространения

(однонаправленная сеть без обратных связей). В качестве функции активации (передаточной функции) использовались линейная функция. Обучение нейронной сети производилось методом обратного распространения ошибки [4].

Метод обратного распространения ошибки минимизирует среднеквадратичную ошибку нейронной сети, при этом используется метод градиентного спуска в пространстве весовых коэффициентов и смещений нейронной сети. Согласно методу градиентного спуска по поверхности ошибок изменение весовых коэффициентов и смещений сети осуществляется по формулам:

$$W_{ij}(t+1)=W_{ij}(t)-\alpha*\partial E(k)/\partial W_{ij}(t); \quad S_{ij}(t+1)=S_{ij}(t)-\alpha*\partial E(k)/\partial S_{ij}(t),$$

где W_{ij} – весовые коэффициенты; S – смещения сети; $E(k)$ – среднеквадратичная ошибка для одного из k нейронов сети, определяемая по формуле:

$$E=(1/2)*\sum_{j=0}^p (y_j-t_j)^2,$$

где t_j – желаемое или целевое выходное значение j нейрона сети.

В процессе исследований была создана компьютерная модель САУ на основе ПИД-регулятора, включающая систему охлаждения, ПИД-регулятор и искусственную нейронную сеть, используемую для подбора параметров ПИД-регулятора. Разработанная компьютерная модель была реализована в виде программы для ЭВМ.

Для демонстрации возможностей разработанной САУ на основе нейросетевого ПИД-регулятора решалась задача управления расходом охлаждающей жидкости в системе охлаждения энергетического оборудования.

Система охлаждения состоит из бака с охлаждающей жидкостью и системы управления, поддерживающей требуемый уровень жидкости в баке. Система управления регулирует степень открытия клапана, размещенного на трубопроводе, подводящем охлаждающую жидкость в бак. Вытекание жидкости из бака происходит самотеком. Задаются высота и площадь горизонтального сечения бака, а также площадь поперечного сечения отводящего трубопровода. Схема системы охлаждения представлена на рис. 3.

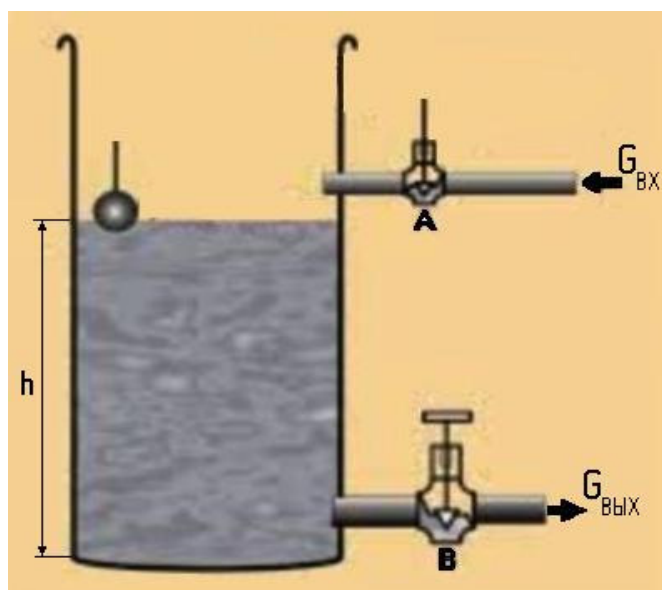


Рис. 3. Схема системы охлаждения

Параметры бака: высота $H=2$ м, площадь горизонтального сечения $S=1$ м², площадь выходного отверстия $f_{\text{вых}}=0,05$ м². Начальные расход $G_{\text{вх}}=0,5$ м³/с и уровень жидкости

$h_0=1,5$ м. Требуемое значение уровня жидкости $h_z=1,0$ м.

Динамика процесса описывается следующими уравнениями:

$$h=V/S; dh/dt=(G_{вх}-G_{вых})/S; G_{вых}=\sqrt{2*g*h}*f_{вых},$$

где $V=h*S$ – объем жидкости в баке [$м^3$]; $g=9,8$ – ускорение свободного падения [$м/с^2$].

В результате моделирования переходных процессов управления путем выполнения расчетов на ЭВМ получена зависимость изменения высоты уровня жидкости в баке от модельного времени: $h=f(t)$. Расчеты производились для различных алгоритмов управления:

- пропорциональный алгоритм (П-регулятор) (рис. 4);
- пропорционально-интегрально-дифференцирующий алгоритм (ПИД-регулятор) (рис. 5);
- нейросетевой пропорционально-интегрально-дифференцирующий алгоритм (НСПИД-регулятор) (рис. 6).

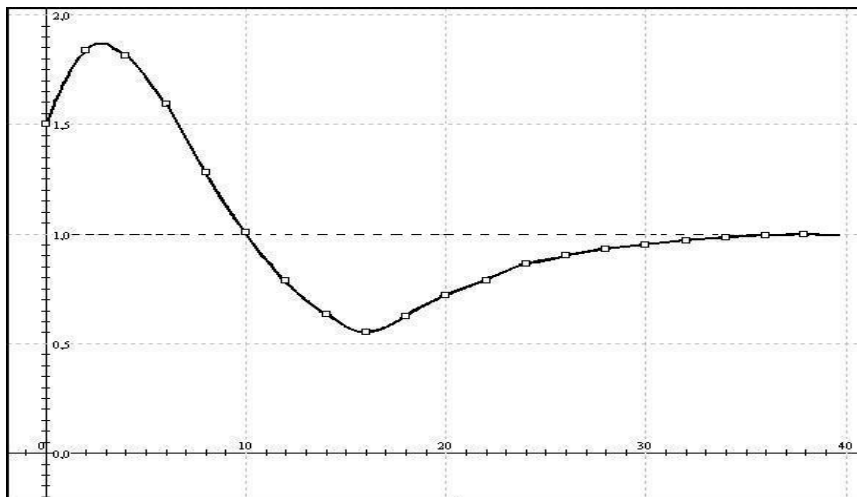


Рис. 4. Переходный процесс управления САУ с П-регулятором

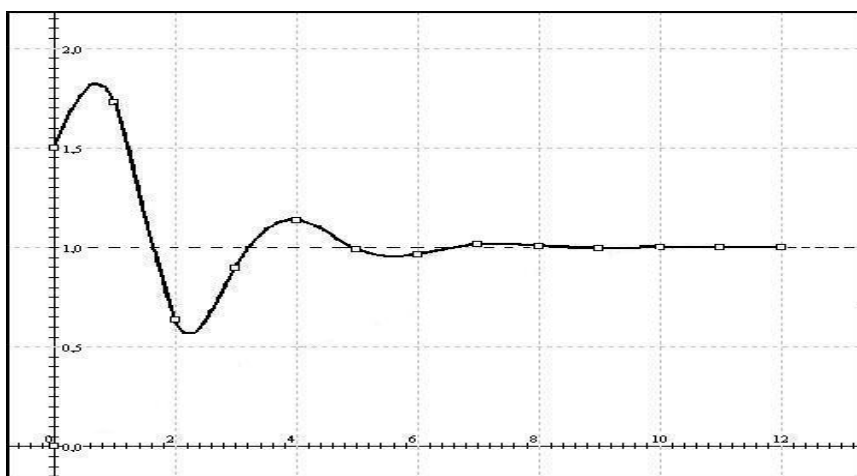


Рис. 5. Переходный процесс управления САУ с ПИД-регулятором

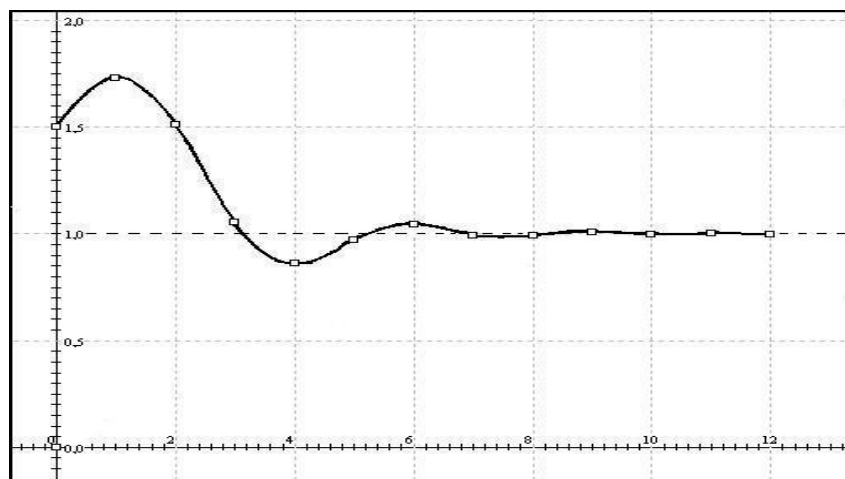


Рис. 6. Переходный процесс управления САУ с НСПИД-регулятором

Как видно из представленных графиков переходных процессов управления, П-регулятор существенно уступает по качеству управления ПИД-регулятору и НСПИД-регулятору по длительности переходного процесса ($T_r=40$ и $T_r=10$ соответственно). В свою очередь, ПИД-регулятор уступает по качеству управления НСПИД-регулятору по максимальному отклонению в динамике управляемой величины и по декременту затухания переходного процесса.

Использование искусственной нейронной сети в составе САУ в качестве средства подбора в процессе управления параметров ПИД-регулятора повышает качество управления путем уменьшения в динамике максимального отклонения управляемой величины и увеличения декремента затухания переходного процесса. Кроме того, отпадает необходимость в дополнительной настройке ПИД-регулятора, которая заключается в подборе параметров регулятора (значений коэффициентов K_p , K_i , K_d).

Литература

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. М.: МЭИ, 2005.
2. Штейнберг Ш.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // АСУ для промышленных предприятий. 2007. № 7.
3. Денисенко В.А. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1.
4. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. М.: Изд-во «Вильямс», 2006.

References

1. Rotach V.Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. dliya vuzov. M.: MEI, 2005.
2. Shteinberg Sh.E. Problemy sosdaniya i ecspluatacii effectivnyh system regulirovaniya // ASU dliya promyshlennyh predpriyatij. 2007. № 7.
3. Denysenco V.A. PID-control: prncipy postroeniya i modificacii // Sovremennyaa tehnologii avtomatizacii. 2007. № 7.
4. Haikin S. Neironnyye seti. Polnyi kurs. M.: Izd-vo «Vilyams», 2006.