

дифференцирующее устройство. Регуляторы с такой «добавкой» получили название - ПИД- регуляторы. Первый такой регулятор был создан в 1910 году. Как и ПИ- регулятор он был гидравлическим и отличался от него только дополнительным устройством – дифференциатором, технически реализовать которое не представляло сложности.

Компьютерные модели САР с таким регулятором, а также графики, характеризующие динамику такой системы, показаны на рисунке 5.

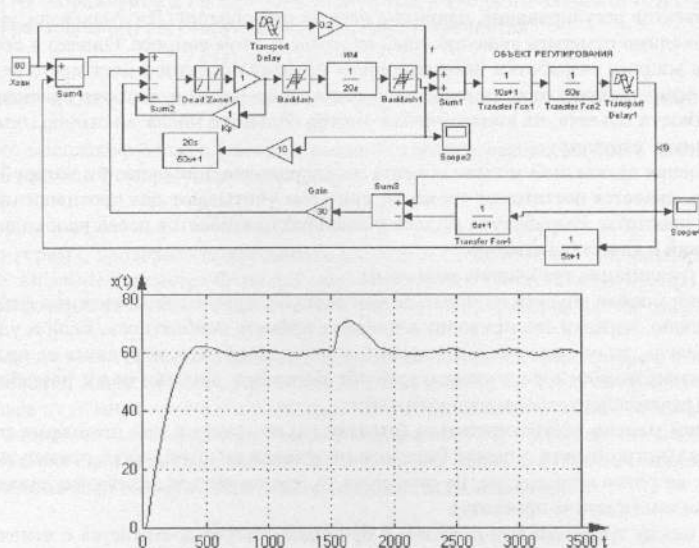


Рис. 5 - Структурная схема САР с ПИД- регулятором и графики переходных процессов в ней

Вновь создаваемые САР с такими алгоритмами регулирования в настоящее время являются преобладающими.

Литература

1. Андронов А.А., Вознесенский И.Н. О работах Д.К.Максвелла, И.А. Вышнеградского и А.Стодола в области теории регулирования машин. В кн.: Д.К.Максвелл, И.А. Вышнеградский и А.Стодола. Теория автоматического регулирования. Линеаризованные задачи. М., изд. АН СССР, 1949.
2. Airy G. Supplement to a paper «On the regulation of the clock-work for effecting uniform movements of equatorials». Memoirs of the Royal Astronomical Society, v.20, 1851.
3. J.Cl.Maxwell. On governors. Proc. Royal Society, v.16, 1868, P.270-283.

УДК 62-933.6:004.942

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Павлов А.И., к. т. н., доцент

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Изложены предложения по повышению точности имитационной модели объекта регулирования. Рассматривается эволюция и перспективное направление развития автоматических регуляторов. Показывается возможность реализации в программной среде промышленных контроллеров комплекса «КОНТАР» высоко эффективного автоматического регулятора, использующего простейшую искусственную нейронную сеть.

Propositions for improvement of the accuracy of the management object's simulation model were presented. The evolution and prospects of the directions of the automatic regulators development have been considered. The possibility of realization of the highly effective automatic regulator, using the simplest artificial network in the software of the industrial controllers of "KONTAR" complex has been shown.

Ключевые слова: система регулирования, объект, регулирующий орган, модель объекта, нейронная сеть.

Введение

Основных способов повышения эффективности управляющих воздействий автоматических регуляторов два.

Первый из них - повышение адекватности имитационных моделей объектов регулирования. «Технологические агрегаты как объекты управления являются гораздо более сложными, чем представление о них, отражаемое в используемых моделях» [1]. Если проанализировать, как исторический процесс, разработку и использование моделей объектов регулирования, начиная с первых публикаций (Дж. Максвелл, И.А. Вышнеградский, А. Стодола), то необходимо отметить существенный прогресс в этом вопросе. Однако и сегодня еще можно констатировать, что в вопросе разработки имитационных моделей объектов имеет место редукционизм. Он может быть преодолен, если использовать методологию системного анализа, которая ориентирует исследователя на раскрытие целостности объекта, на выявление как можно большего числа многообразных типов связей в нем и сведение их в единую структуру.

Задача построения адекватной модели объекта регулирования, при решении которой применяют операцию его декомпозиции, является достаточно сложной; при этом учитывают два противоречивых требования (принципа): полноты и простоты. Разработчик модели всякий раз оказывается перед необходимостью выбора одного из двух направлений в качестве главного.

Первый путь (реализация требования полноты):

при построении модели объекта постараться максимально учесть все возможные факторы, которые влияют на него. К сожалению, нередко это приводит к попытке «объять необъятное». Если и удастся построить такую имитационную модель, то она получается сложной и громоздкой, что затрудняет ее практическое использование. Кроме того, такие модели дорого стоят и требуют большого времени на их разработку;

Второй путь (реализация требования простоты):

при построении модели абстрагироваться (отказаться) от учета в ней некоторых параметров, факторов и характеристик реального объекта с целью быстрого получения простой, легко реализуемой, модели. Этот путь находит наиболее широкое применение, не смотря на то, что он иногда ведет к неудачам - модели утрачивают адекватность объектам (плата за простоту).

Компромисс между требованиями полноты и простоты обычно достигается с использованием понятия существенности. Но понятие существенности – неформальное. Что в модели существенное может определить только эксперт. В ряде случаев адекватность моделей объектов можно повысить достаточно простыми средствами, доступными практически всем разработчикам.

Второй способ повышения эффективности управляющих воздействий автоматических регуляторов - использование современных, по сравнению с ПИД, алгоритмов формирования сигналов управления.

1. Повышение адекватности имитационной модели объекта регулирования

Регулирующие органы (РО) по-прежнему являются необходимыми элементами, если не большинства, то многих проектируемых систем автоматического регулирования (САР). К сожалению, разрабатываемые модели (структурные схемы) САР характеризуются тем, что статические и динамические свойства РО обычно не находят в них должного отражения. Следствием этого является снижение уровня адекватности моделей САР реальным объектам регулирования. Весьма типично, например, принято считать, что коэффициент передачи РО равен единице и поэтому РО можно не отображать в структурной схеме объекта регулирования. И это в то время как именно РО нередко является основной причиной нелинейности реального объекта.

В практике автоматизации все еще широко применяют дроссельные РО, которые представляют собой перемещаемые гидравлические сопротивления. Величина сопротивления РО зависит от положения подвижной его части - затвора, перемещение которого сопровождается изменением площади (а часто и геометрии) проходного («живого») сечения РО. Это приводит к изменению потерь давления в РО и, вследствие этого, меняется количество вещества (жидкости, газа, пара), проходящего через него. К числу основных параметров дроссельных РО относятся [2,3]: степень открытия l (0...1), пропускная способность K_v , условная пропускная способность K_{0y} и пропускная характеристика:

$$\sigma = K_g / K_{gy} \quad (1)$$

Многие РО (клапаны, заслоночные и некоторые крановые) имеют равнопроцентную (логарифмическую) пропускную характеристику. Если основное координатное возмущение в САР связано с изменением параметра среды, проходящей через РО (давление, температура, вязкость и т. п.), что приводит к изменению ее расхода при неизменном (постоянном) положении затвора РО, то предпочтительной является именно равнопроцентная пропускная характеристика. Такой вид координатного возмущения, действующего по каналу управления, весьма типичен для многих реальных объектов; поэтому РО с равнопроцентной характеристикой применяют очень часто.

Для многих реальных объектов регулирования, наряду с координатными возмущениями, характерны и параметрические возмущения. Вследствие этого при больших изменениях коэффициента передачи объекта (обычно в сторону уменьшения) снижается управляемость объектом вплоть до полной ее утраты. В таких случаях надо повышать коэффициент передачи объекта, восстанавливая его первоначальное (либо близкое к нему) зна-

чение [4]. Альтернативой является использование РО с большей величиной K_{0y} , что требует смены типоразмера РО. К этому способу (по ряду причин) прибегают довольно редко. Однако предусмотреть возможность изменения пропускной характеристики РО в модели объекта можно и необходимо. Для этого в нее нужно ввести масштабирующий элемент (пропорциональное звено), коэффициент передачи K_{m1} которого характеризует текущую величину пропускной способности РО.

Статическая (расходная) характеристика РО связывает изменение управляющего воздействия $U(t)$, в имитационных моделях САР выражаемое в процентах перемещения выходного элемента исполнительного механизма, с относительным расходом $q(t)$ регулирующей среды тоже в процентах:

$$q(t) = Q(t) / Q_{\max} \cdot 100, \% , \quad (2)$$

где $Q(t)$ -текущий расход, а Q_{\max} -максимальный расход регулирующей среды в положении полного открытия РО.

Задачей указанного масштабирующего элемента является преобразование текущего значения параметра $q(t)$ в величину объемного расхода $Q_v(t)$ регулирующей среды:

$$Q_v(t) = K_{m1}q(t), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3)$$

Это позволяет, во-первых, проверить правильность расчета РО и выбора его типоразмера, а, во-вторых, делает возможным использование параметра $Q_v(t)$ для автоматического вычисления основных показателей эффективности САР: потребляемой объектом мощности $N(t)$, количества потребленной им энергии $W(t)$ и ее стоимости $S(t)$.

В пищевой промышленности процессы тепловой обработки обычно осуществляют с использованием водяного пара низкого давления. Характерным координатным возмущением по каналу управления является отклонение давления $P(t)$ пара от номинального его значения. Компенсацию неустойчивости давления пара и других (неконтролируемых) координатных и параметрических возмущений регулятор обеспечивает посредством изменения величины объемного расхода $Q_v(t)$ так, чтобы получаемая объектом тепловая мощность $N(t)$ (тепловой поток $\Phi(t)$) соответствовала всей совокупности действующих на него возмущений:

$$N(t) = \Phi_1(t) = Q_v(t) \cdot P(t), \text{ Вт}, \quad (4)$$

$$\Phi(t) = K_{m2} \cdot \Phi_1(t), \text{ кВт}, K_{m2} = 0,001. \quad (5)$$

Таким образом, структура модели объекта регулирования температуры, например, с равнопроцентной пропускной характеристикой РО (а пропускная характеристика в целом практически всегда не линейна) и передаточной функцией $W_o(P)$ приобретает вид, показанный на рис. 1.

При подключении регулятора к реальному объекту обычно обнаруживается некоторое несоответствие (в статике и динамике) реального параметра $Y(t)$ параметру $Y_m(t)$ модели объекта, мерой которой является величина $D(t)$:

$$\pm D(t) = Y(t) - Y_m(t). \quad (6)$$

Модуль разности тем меньше, чем качественнее была проведена работа по идентификации статических и динамических свойств реального объекта. Выявленное различие желательно уменьшить (посредством изменения (подгонки) параметров передаточной функции $W_o(P)$ до нуля), сделав тем самым модель адекватной объекту. Такая корректировка модели объекта регулирования не требует большого времени, а полученную в результате такой работы модель можно считать эталонной. Однако далее, в процессе работы реальной САР, ввиду наличия параметрических возмущений величина $D(t)$ постепенно будет нарастать, что потребует со временем восстановления параметров реального объекта близких или (в идеале) совпадающих с исходными. Альтернативой, как отмечалось выше, является увеличение типоразмера РО. Это не исключает смены алгоритма регулирования либо, как минимум, его модификации. Например, подключение к модели объекта вычислительного блока ВБ позволяет рассчитывать непрерывно величину необходимой коррекции ΔK_r коэффициента передачи регулятора, учитывающую нелинейность расходной характеристики РО и оперативно эту информацию использовать с целью повышения качества регулирования.

Программное обеспечение современных промышленных контроллеров позволяет не только вычислять всю указанную совокупность параметров ($q(t)$, $\Phi(t)$, $W(t)$, $S(t)$, $\pm D(t)$, $\pm \Delta K_r(t)$, $Q(t)$), но и наблюдать их изменение в реальном времени, а при необходимости - архивировать.

Поскольку для вычисления величины теплового потока $\Phi(t)$, потребляемого технологическим агрегатом, необходима информация о текущей величине давления пара $P(t)$, то возникает вопрос: как получить эту информацию? К сожалению, вычислить этот параметр по текущему положению затвора РО (используя сигнал датчика положения выходного элемента исполнительного механизма) нельзя. Дело в том, что величина давления пара, поступающего в технологический агрегат, зависит также и от давления в источнике питания (магистральном паропроводе цеха). А оно не постоянно. Итак, необходимо измерять давление пара на входе в технологический агрегат. Но эти дополнительные затраты вполне оправданы, поскольку, во-первых, повышается точность модели объекта, а во-вторых, в случае, например, реализации алгоритма управления с использованием искусственных нейронных сетей (что весьма актуально) этот сигнал о величине параметра $P(t)$ будет использован таким нетрадиционным регулятором.

Представленная на рис. 1 схема модели объекта соответствует случаю, когда технологический агрегат поглощает весь пар, поступающий в него. Во многих случаях (процессы пастеризации, стерилизации и т.д.) технологический агрегат потребляет лишь часть теплового потока. В таких случаях необходимо измерять дополнительно (если используется не жидкость (обычно вода), а водяной пар) давление (или температуру) и расход теплоносителя в отводящем трубопроводе. Это неизбежно приводит к усложнению модели объекта, однако такая проблема вполне преодолима.

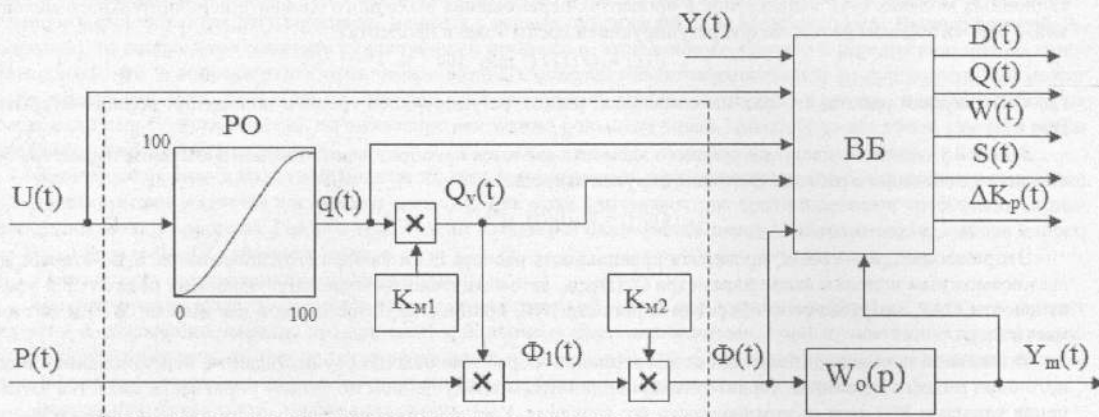


Рис. 1 – Структурная схема модели объекта регулирования

Такой же прием можно использовать и в процессах охлаждения, когда применяют такие среды как аммиак, рассол, фреон, воздух, вода. В этих случаях меняется направление теплового потока: не к технологическому агрегату, а от него. Изменение направления теплового потока отображается в модели объекта в смене знака при его коэффициенте передачи.

«Процесс усовершенствования моделей – это процесс их постепенного обогащения или переработки. Основная забота специалиста в науке управления состоит в том, чтобы сделать свой вклад релевантным, то есть полезно воздействующим на способ управления» [5].

2. Регулятор на основе искусственной нейронной сети – современное альтернативное решение задачи повышения эффективности управления

Как известно, первым промышленным регулятором, получившим широчайшее применение в практике автоматизации, был пропорциональный регулятор, изобретенный в 80-е годы XVIII века Дж. Уаттом (т.н. «конический маятник»). Пропорциональные регуляторы прямого действия и в настоящее время применяются наиболее широко для стабилизации таких параметров как давление, уровень и температура, в тех случаях, когда они не относятся к числу основных параметров производственного процесса, то есть когда возникающее остаточное отклонение регулируемого параметра от заданного его значения вполне приемлемо.

Нет ничего удивительного в том, что уже на протяжении 230 лет пропорциональные регуляторы применяются наиболее часто. Обусловлено это их высокими, как теперь принято говорить, потребительскими свойствами: простота конструкции, компактность, надежность, долговечность в работе, низкая стоимость. Этот список необходимо дополнить еще таким важным достоинством, как отсутствие необходимости рассчитывать, а затем настраивать, единственный параметр алгоритма – коэффициент передачи регулятора. Потребителю необходимо только, после установки регулятора на объекте управления, задать нужное значение регулируемого параметра, соответствующего указанному в паспорте регулятора диапазону.

Хотя ПИ-регулятор был изобретен в 1840г., а ПИД-регулятор в 1910г., их применение долгое время сдерживалось отсутствием инженерной методики настройки их параметров. Когда в 1942г. Николс и Циглер разработали методику настройки ПИД-регуляторов, это сразу расширило их применение. Количество патентов, выданных в США на ПИД-регуляторы к январю 2006 года составило 364 шт.

Середина 20 века, вплоть до начала 80-х годов, характеризуется доминированием пневматических ПИ-, ПИД-регуляторов по сравнению с гидравлическими и электрическими. С появлением микропроцессорных средств управления ситуация стала быстро меняться в пользу электрических систем регулирования, поскольку они позволяют реализовать алгоритмы управления любой сложности. Однако и в настоящее время при разработке новых проектов систем автоматического регулирования (САР), как правило, используют традиционные ПИ- и ПИД-алгоритмы, хотя и с самонастройкой их параметров. Но даже и в этих случаях такие САР характеризуются сравнительно малой грубостью (по А.А. Андронову), если возникают большие координатные и, в особенности, параметрические возмущения.

Широкое использование на практике в задачах регулирования новейших технологий (нечеткой логики, генетических алгоритмов, искусственных нейронных сетей, а также их гибридов) тормозится сложностями разработки таких алгоритмов, хотя потенциально они могут давать заметное повышение качества управления по сравнению с ПИД-алгоритмами.

Цель всегда требует идеала.

Поставим два вопроса: а) какой регулятор на современном этапе развития науки, техники и технологии производственных процессов можно было бы назвать «идеальным»; б) возможно ли в настоящее время (хотя бы частичное) достижение поставленной цели – построение такого регулятора?

Ответить на первый вопрос не сложно.

«Идеальный» регулятор должен: давать качество регулирования по всем объективным показателям существенно более высокое по сравнению с ПИД-алгоритмам при всех видах возмущений, действующих на САР; допускать использование простых методик идентификации объекта регулирования и даже (страшно сказать!) «согласен» работать с объектом, параметры которого определены «на глаз», то есть с большой погрешностью; позволять использование программно реализованного, содержащегося в библиотеке промышленного контроллера, алгоритма регулирования без перенастройки численных величин его параметров, которые «по умолчанию» в нём имеются (заданы изготовителем контроллера), хотя и допускают (при возникновении у пользователя контроллера такого желания) их изменение.

Имеются основания предполагать, что подобно тому, как регуляторы прямого действия могут решать задачу стабилизации параметра в довольно узком его диапазоне изменений, будущие программы контроллеров, реализующие алгоритмы регулирования, альтернативные ПИД, будут тоже настраиваться изготовителем контроллера, на тот или иной, достаточно широкий, диапазон изменения параметров объекта.

Можно также предположить, что наиболее результативной будет работа по проектированию алгоритмов регулирования, более эффективных, чем ПИД, в вариантах использования искусственных нейронных сетей (ИНС). Объясняется это тем, что именно ИНС наиболее «подготовлены» для их использования в современных (и в особенности – будущих) АСУ ТП: результативность их применения возрастает с увеличением количества аналоговых сигналов, подаваемых на входы ИНС. А характерной тенденцией развития АСУ ТП является возрастание размерности (числа) обрабатываемых сигналов, и в первую очередь – аналоговых[1].

В варианте ИНС, состоящей всего из одного активного нейрона, сигнал управления $U(t)$ представляет собой сумму «взвешенных» входов

$$net = \sum_{i=1}^n (k_i \cdot x_i), n > 1, \quad (7)$$

где k_i – коэффициенты передачи, x_i – входные сигналы ИНС, n – количество входных сигналов ИНС.

Таким образом, сигнал управления формируется n , параллельно работающими, пропорциональными алгоритмами. Именно благодаря увеличению количества этих однотипных алгоритмов и удается получить новое качество управления. Можно говорить, что мы имеем дело с такой эволюцией развития алгоритмов управления, которая вновь привела («как бы») к пропорциональным алгоритмам, но с новыми их возможностями.

Даже в варианте ИНС, когда она обрабатывает очень небольшое число сигналов (от двух до четырех), и в отсутствие, что очень важно отметить, в структуре регулятора каких-либо дифференцирующих звеньев, удается получить результаты, заслуживающие внимания.

Ниже приведены графические результаты моделирования САР, использующей ИНС с одним активным нейроном для решения задачи управления статическим объектом второго порядка с запаздыванием

$$W_o(p) = \frac{k \cdot e^{-Tp}}{(T_1p+1) \cdot (T_2p+1)}. \quad (8)$$

Исполнительный механизм – пропорционального действия с передаточной функцией

$$W_{им}(P) = \frac{e^{-0,3P}}{(0,7p+1)^2}. \quad (9)$$

Такая модель соответствует реальному пневматическому мембранному исполнительному механизму, оснащённому позиционером.

Дроссельный РО имеет равнопроцентную пропускную характеристику.

Обучение ИНС проводилось однократно и в процессе моделирования САР никакие изменения в алгоритм управления не вносились. Для обучения ИНС были приняты следующие численные величины параметров модели объекта: $k=0.5$; $\tau=4$ с; $T=10$ с.

Модель САР подтвердила свою работоспособностью в условиях наличия координатных возмущений, действующих по каналу управления, и больших параметрических возмущений; при этом были определены границы

допустимых изменений параметров модели объекта, не требующие обязательного изменения и параметров регулятора:

$$0,3 \leq K \leq 2; (T_1 = T_2) \geq 2c.$$

(10)

Некоторые результаты имитационного моделирования САР с использованием инструментальной системы программирования КОНГРАФ представлены на рис. 2, 3 и 4.

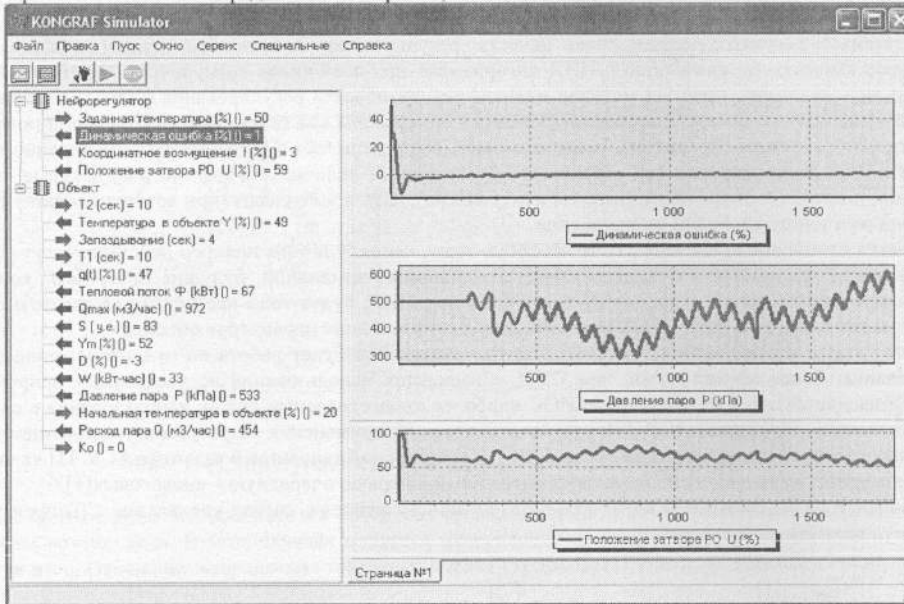


Рис. 2 – Пример 1 использования предлагаемой модели объекта в структуре стабилизирующей САР с нейронным регулятором ($K=0.5$; $T_1=T_2=10c$; запаздывание $4c$)

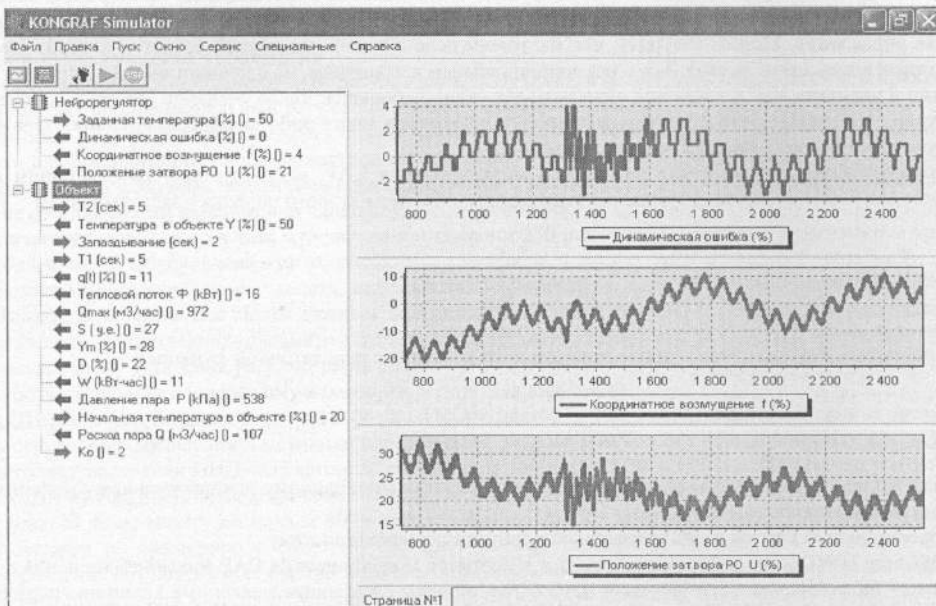


Рис. 3 – Пример 2 использования предлагаемой модели объекта в структуре стабилизирующей САР с нейронным регулятором ($K=2$; $T_1=T_2=5c$; запаздывание $2c$)

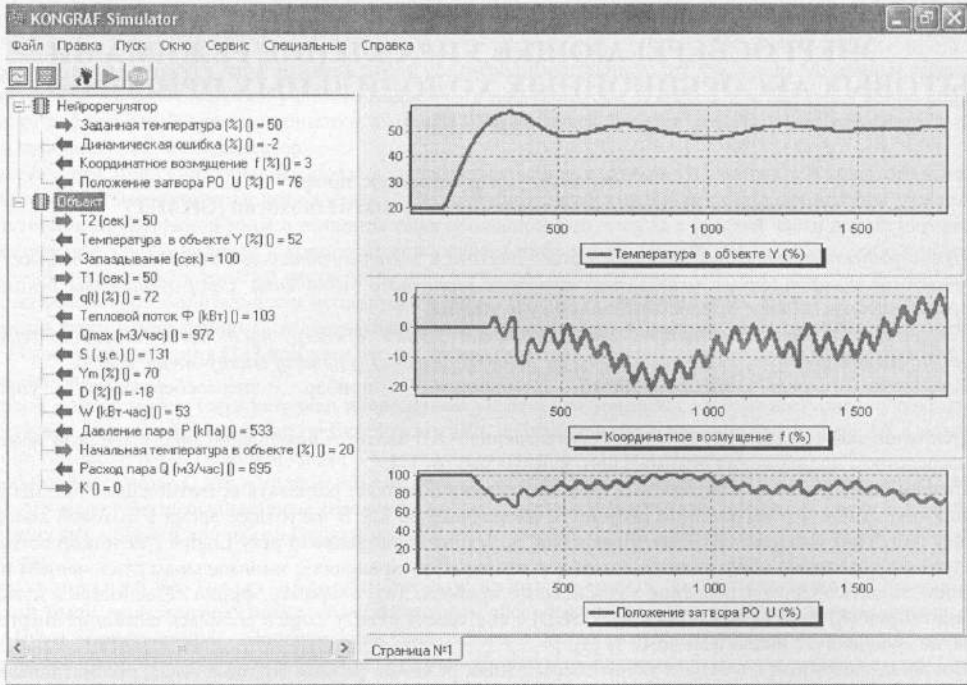


Рис. 4 – Пример 3 использования предлагаемой модели объекта в структуре стабилизирующей САР с нейронным регулятором ($K=0.3$; $T1=T2=50c$; запаздывание $100c$)

«Философия – это когда берешь нечто настолько простое, что об этом, кажется, не стоит и говорить, и приходишь к чему-то настолько парадоксальному, что в это просто невозможно поверить» (Бертран Рассел).

Выводы

1. Рассмотренная схема представления объекта позволяет в процессе имитационного моделирования САР и при работе реальной САР получать важную разнообразную дополнительную информацию о САР и результатах ее функционирования.
2. Более подробное рассмотрение процессов преобразования и взаимодействия параметров, характеризующих и сопровождающих работу РО, позволяет повысить уровень адекватности моделей САР физическим процессам в реальном технологическом агрегате.
3. В тех случаях, когда не требуется высокая точность измерения величин параметров Φ , W и S , возможно их определение и без использования на реальном объекте дорогих тепловых счетчиков.
4. Регуляторы с ИНС простейшей структуры (один активный нейрон) могут обеспечивать более высокое качество регулирования, по сравнению с ПИД-регуляторами, при больших параметрических возмущениях, и координатных возмущениях, действующих по каналу управления.
5. Программно реализованные алгоритмы регулирования на основе ИНС не требуют во многих случаях их настройки при использовании на реальных объектах, в том числе и при наличии больших параметрических возмущений.
6. Если идентификация параметров объекта выполнена с небольшими погрешностями, то рекомендуется переобучить ИНС. При малой размерности ИНС эта процедура выполняется элементарно, а качество регулирования возрастает весьма значительно.
7. Отсутствие в структуре алгоритма управления дифференцирующих звеньев повышает устойчивость реальных САР к электромагнитным помехам и поэтому задача фильтрации сигналов измерительных каналов становится более простой.

Литература

1. Хобин В.А. Системы гарантирующего управления технологическими агрегатами: основы теории, практика применения /Одесская национальная академия пищевых технологий – Одесса: «ТЭС», 2008. –306 с.
2. Аруманов Э.С. Гидравлические регулирующие органы систем автоматического управления. М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
3. Аруманов Э.С. Расчет и выбор регулирующих органов автоматических систем. М.: Энергия, 1971. – 112 с.
4. Воинова С.А. Особенности управления техническими объектами на траектории расходования расчетного ресурса /Автоматизация технологических и бизнес-процессов, №1, 2010. – с. 10–13.
5. Моррис У. Наука об управлении. Байесовский подход. –М.: «Мир», 1971. – 304 с.
6. Павлов А.И. Технология проектирования нейронных регуляторов. Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – Одесса: -2010, №4.
7. Павлов А.И. Нейросетевая система регулирования высокой динамической точности // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса:-2008.-Вип.33.-с. 64-69.
8. Павлов А.И. Нейронная система регулирования // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса: - 2007. - Вип. 31. –Т.2. - с. 72-77.
- Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. – М.: “Вильямс”, 2001. – 288 с.