

УДК 681.52

В.С. МИХАЙЛЕНКО<sup>1</sup>, Р.Ю. ХАРЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Одесская национальная академия пищевых технологий «ОНАПТ», Украина<sup>2</sup> Одесская национальная морская академия «ОНМА», Украина

## АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ АДАПТАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И ИХ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

На основе анализа одного из ведущих традиционных способов адаптации систем автоматического управления сложных объектов, предложен интеллектуальный подход для решения задач выбора оптимальных настроек ПИ и ПИД регуляторов. Компьютерная апробация предлагаемого подхода, а также процедуры адаптации при определении оптимальных параметров типовых регуляторов обеспечивает существенное снижение информационной сложности алгоритма поиска оптимальных настроек регуляторов и улучшение показателей качества переходных процессов. В качестве примера реализации предложенный метод реализован программным путем на САР пароперегревателя парового котла ТЭС по одному из основных каналов управления при влиянии параметрических возмущений в рабочих режимах при заданных запасах устойчивости, а также для САР системы кондиционирования. Результат показал адекватность работы системы и возможность применения метода для внедрения в производство.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, адаптация, генератор синусоидальных колебаний, пароперегреватель парового котла, параметрическое возмущение, теплообменник.

### Введение

Актуальной технической проблемой современных систем автоматического управления (САУ) сложных объектов является обеспечение высокой экономичности и запасов устойчивости в широком диапазоне режимов работы оборудования – т.е. поиск оптимальных настроек регуляторов систем автоматического регулирования (САР). Данная проблема может решаться экспериментальным путем. Однако существенное снижение затрат на экспериментальные исследования, связанные с поиском оптимальных параметров и законов регулирования для обеспечения эффективной работы технологического процесса, возможно за счет внедрения в практику проектирования и наладки САР современных методов и технологии адаптивного управления.

В связи с этим актуальной научной проблемой является развитие научных подходов и разработка новых эффективных математических и интеллектуальных методов и алгоритмов решения задач адаптации САУ и САР.

Известные методы определения частотных характеристик основаны на применении синусоидальных сигналов, сигналов, аппроксимирующих синусоидальные, или полигармонических сигналов [1].

Эти методы получили большое распространение при исследовании сложных промышленных объектов. Различают прямые детерминированные

частотные методы, основанные на непосредственном измерении амплитуды и фазы выходного сигнала, и статистические частотные методы [2]. Имеется и ряд других методов, не получивших, однако, широкого применения на практике.

Исходя из анализа научной литературы [3] можно заключить, что прямые методы определения частотных характеристик обладают рядом преимуществ:

- 1) большой точностью, так как гармонические входные сигналы ортогональны в разных точках измерения и, таким образом, каждая точка частотных характеристик определяется независимо от других;
- 2) простотой обработки;
- 3) возможностью проведения измерений в замкнутой системе;
- 4) малым влиянием шумов;
- 5) большой избыточностью информации.

Однако им присущ и ряд недостатков:

- 1) сложность оборудования для проведения измерений на низких частотах (генератор);
- 2) большое время измерения;
- 3) необходимость преобразования сигналов;
- 4) большое количество оборудования;
- 5) условия измерения и параметры исследуемого объекта успевают измениться за время наблюдения.

При обработке амплитуду выходного сигнала

для каждой частоты уменьшают в  $\pi/4$  раза, т. е. приблизительно на 27%. Измерения начинают проводить с самых высоких частот, и, так как промышленные объекты являются инерционными, на высших частотах выходной сигнал является синусоидальным. На низших частотах вводят коррекцию по 3, 5 и 7-й гармоникам. Этот метод был исследован на некоторых промышленных объектах [4], а именно на системе регулирования уровня воды в котле паросиловой установки производительностью 350 т/ч и на системе регулирования числа оборотов турбины мощностью 12,5 МВт. При уровне шумов  $q \approx 10$  дБ метод показал хорошие результаты. Следует отметить, что метод отличается длительностью и чувствительностью к внешним возмущениям.

Также, если объект обладает существенными нелинейными свойствами, то при его идентификации рекомендуется воспользоваться научными разработками Н. Винера. Ученый показал [4], что оптимальным пробным сигналом, каким является гармонический сигнал для исследования линейных систем, при исследовании нелинейных систем служит белый шум. Так как белый шум физически нереализуем, практически реализуют некоторую модель белого шума, имеющую постоянную спектральную плотность в диапазоне рабочих частот объекта, и дисперсию, превышающую диапазон изменения мощности рабочего входного сигнала объекта. Однако процесс идентификации носит длительный, сложный и дорогостоящий характер в виду необходимости использования специальной сигнальной аппаратуры и обученного персонала.

### Постановка задачи исследования

Проанализировав распространенный на производстве вариант сигнальной адаптации - с помощью подачи на систему ступенчатых воздействий, можно утверждать, что подход отличается слабой помехоустойчивостью. По мнению авторов, предпочтение следует отдать синусоидальным идентифицирующим воздействиям [1]. Подобные воздействия значительно более помехоустойчивы по причине оценки установившейся, а не переходной реакции системы. Структурная схема системы, осуществляющей адаптацию системы регулирования с помощью синусоидального воздействия  $u(t) = A_u \sin \omega t$ , получаемого от специального генератора синусоидальных колебаний (ГСК), аналогична схеме адаптации по переходной характеристике системы. Если исследуемая система близка к линейной или ее модель линеаризована, то после подачи синусоидальных колебаний на вход на ее выходе, через некоторое время, также установятся синусоидальные колебания той же частоты. Эти колебания будут иметь

другую амплитуду  $A_y$  и окажутся сдвинутыми по времени на некоторую величину  $\Delta t$ , что соответствует сдвигу по фазе  $\varphi_y = \omega \Delta t$ :

$$y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi_y). \quad (1)$$

По этим данным оценивается вектор комплексной частотной характеристики (КЧХ) замкнутого контура

$$\begin{aligned} \Phi_{yu}(j\omega) &= A(\omega) \exp[j\varphi(\omega)], \\ A(\omega) &= A_y/A_u, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A(\omega)$  – значение амплитудной частотной характеристики (АЧХ) системы для частоты  $\omega$ ;

$\varphi_{yu}(\omega)$  – значение фазовой частотной характеристики (ФЧХ).

Оценку вектора КЧХ системы по колебанию выходной величины удобно производить, выделяя из него первую гармонику разложения в ряд Фурье. Для этого целесообразно разделить выходную величину на амплитуду входного синусоидального воздействия, воспользуемся формулами:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} y(t) \sin \frac{2\pi}{T} t dt, \\ b_1 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} y(t) \cos \frac{2\pi}{T} t dt, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $T$  – период колебаний.

Данные коэффициенты определяют вещественную  $P(\omega)$  и мнимую  $Q(\omega)$  составляющую КЧХ системы, так как

$$y(t) = \frac{A_y}{A_u} \sin(\omega t + \varphi) = A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)], \quad (4)$$

то

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)] \sin \omega t dt = \\ &= A(\omega) \cos \varphi(\omega) = P(\omega); \\ b_1 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)] \cos \omega t dt = \\ &= A(\omega) \sin \varphi(\omega) = Q(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

По найденным значениям вещественной и мнимой характеристик определяются значения АЧХ и ФЧХ замкнутого контура системы:

$$\begin{aligned}
 A(\omega) &= \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \\
 \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}, & \text{ при } P(\omega) > 0; \\
 -\frac{\pi}{2}, & \text{ при } P(\omega) = 0; \\
 \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} - \pi, & \text{ при } P(\omega) < 0.
 \end{aligned} \quad (6)$$

После чего по формуле

$$W_{\mu}(j\omega) = \frac{1}{W_p(j\omega)} \cdot \frac{\Phi_{yu}(j\omega)}{1 - \Phi_{yu}(j\omega)}$$

может быть определена КЧХ объекта.

Организация процедуры настройки состоит из осуществления совместной процедуры «идентификации и оптимизации» системы после каждой очередной оценки вектора КЧХ. Для этого разработчик САУ или адаптер, задавшись предварительно подходящей настраиваемой моделью объекта с двумя свободными коэффициентами, по полученному вектору объекта определяет численные значения этих коэффициентов. Это позволит рассчитать очередную настройку регулятора и резонансную частоту при этой настройке (в случае необходимости оценить и частоту, связанную с резонансной, заданным соотношением), что позволит выбрать и частоту синусоидального воздействия на следующем шаге. После установки этих параметров в регуляторе и ГСК эксперимент и расчет повторяются. В результате возникает итерационная процедура, которая продолжается до тех пор, пока не будет достигнут оптимум настройки.

При использовании упрощенной модели в виде интегрального звена с запаздыванием (5) определяем параметры модели по формулам:

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{мод}} &= \frac{1}{\omega} \left( -\frac{\pi}{2} - \varphi_{\mu}(\omega) \right); \\
 k_{\text{мод}} &= A_{\mu}(\omega)\omega.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Для модели, состоящей из инерционных звеньев с запаздыванием, используется следующее уравнение для определения времени запаздывания.

$$-\arctg(\beta\tau_{\text{мод}}\omega) - \tau_{\text{мод}}\omega = \varphi_{\mu}(\omega). \quad (8)$$

Формула для определения коэффициента передачи имеет вид:

$$k_{\text{мод}} = A_{\mu}(\omega)(1 + \beta^2\tau_{\text{мод}}^2\omega^2)^{0,5n}. \quad (9)$$

Для определения оптимальных параметров настройки пропорционально-интегрального (ПИ) - регулятора можно воспользоваться прежними формулами (5) для модели в виде интегрирующего звена с запаздыванием и (9) для модели с инерционными звеньями. Резонансная частота может быть получена из безразмерной КЧХ замкнутого контура при оптимальных безразмерных параметрах регулятора:

$$\Phi_{\text{опт}}(j\Omega) = \frac{W_{\text{опт}}(j\Omega)}{1 + W_{\text{опт}}(j\Omega)}, \quad (10)$$

где  $W_{\text{опт}}(j\Omega)$  – безразмерная КЧХ разомкнутого контура, которая для настраиваемой модели в виде интегрирующего звена с запаздыванием определяется из (6), а для модели, состоящей из инерционных звеньев с запаздыванием, из формул:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{и.опт}} &= I_{\text{опт}}\tau_{\text{мод}}; \\
 k_{\text{р.опт}} &= K_{\text{опт}}/k_{\text{мод}}; \\
 \omega &= \Omega_{\text{дом}}/\tau_{\text{мод}}.
 \end{aligned}$$

При резонансной частоте  $\Omega_{\text{рез}}$  модуль КЧХ достигает максимума. Частоту ГСК на каждом шаге (при известной величине запаздывания в модели) следует выбрать в соответствии с формулой  $\omega = \Omega_{\text{рез}}/\tau_{\text{мод}}$ , которую целесообразно представить в зависимости от установленной в регуляторе постоянной интегрирования

$$\omega_{\text{рез}} = (\Omega_{\text{рез}}I_{\text{опт}})/T_{\text{и}}. \quad (11)$$

Повторение эксперимента по адаптации ПИ или пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора производится до тех пор, пока параметры настройки не установятся на некотором постоянном уровне. Если колебания на выходе системы искажены действием случайных помех и возмущений, длительность эксперимента по оценке вектора КЧХ системы должна включать несколько периодов колебаний. Конкретное число периодов можно определять в процессе проведения эксперимента, вычисляя на каждом шаге коэффициенты первой гармоники колебаний. Эксперимент окончен, когда будет достигнута стабилизация оценок этих коэффициентов. Начальную частоту эксперимента можно определить, установив в регуляторе достаточно большое значение постоянной времени интегрирования и возбудив в контуре заметные колебания путем [5]:

а) постепенного увеличения коэффициента передачи регулятора (как это имеет место в начале процедуры адаптации по переходной характеристике контура),

б) включения в рассечку контура двухпозиционного реле, как это имеет место в начале процедуры адаптации методом автоколебаний (поскольку теперь достаточно располагать одним - двумя периодами колебания, работу реле можно имитировать вручную). При этом нет необходимости в особой точности оценки величины периода колебаний (Т) (в частности, в первом случае, нет необходимости добиваться незатухающих колебаний), так как значения будут уточняться последующей работой программы адаптации.

### Апробация метода с ГСК и результаты исследований

Рассмотрим частный случай применения рассматриваемого метода. В данной работе авторами произведен анализ представленного метода адаптации на основе исследования эффективности системы автоматического регулирования: объект – пароперегреватель парового котла тепловой электростанции (ТЭС) по каналу «перемещение регулирующего органа расхода охлаждающей воды на парохладитель» – «изменение температуры перегретого пара» с помощью ГСК. Исходя из рекомендаций [3], примем структуру настраиваемой модели объекта в виде звена с запаздыванием при  $\beta = 3,5$ . Начало процедуры адаптации выполним первым из указанных способов, воспользовавшись полученным ранее примером результата вывода контура системы в колебательный режим. Выбрав первоначальную настройку регулятора  $K_n = 0,5$ ;  $T_n = 12$  мин., обеспечивающий САУ запас устойчивости (переходный процесс затухающий) осуществим подачу от ГСК сигнала с периодом  $T = 10$  мин и амплитудой  $A_x = 1$ . Моделирование колебаний на входе и выходе контура в программе MatCad показано на рис. 1. Из рассмотрения полученных графиков (см. крив. рис. 1) следует, что колебания на выходе практически стабилизировались после трех периодов колебаний и, следовательно, в программе можно выбрать  $m = 4$ . Поскольку в рассматриваемом примере случайные помехи не введены, достаточно оценивать значение коэффициентов первой гармоники колебаний выходной величины только на одном периоде. Отношения амплитуд и сдвиг по фазе синусоидальных колебаний на выходе и входе системы, для четвертого периода колебаний, оказались следующими:  $A = 0,118$ ;  $\varphi = -2,7$ .

Программа на рис. 2 вычисляет по этим данным модуль и фазу вектора модели объекта для частоты эксперимента, а также соответствующие ей параметры настройки регулятора и новую частоту идентификации:  $k_n = 2,29$ ;  $1$  и  $T_n = 4,3$ ;  $\omega = 0,394$ . В случае, если переходный процесс не оптимальный, полученные результаты вводятся в адаптивный ПИ -регулятор, и эксперимент повторяется при новом значении частоты ГСК.

При анализе эффективности рассчитанных настроек адаптивного ПИ - регулятора в программном пакете MatLab (Simulink), при влиянии на объект внутреннего возмущения (рис. 3), получены следующие переходные процессы (рис. 4). В рассмотренном примере для теплоэнергетического объекта стабилизация значений параметров настройки произошла после второго шага, показав следующий результат:  $k_{опт} = 2,29$ ;  $T_{нпт} = 4,3$ . Получаемый при

такой настройке процесс регулирования продемонстрировал следующие показатели качества при влиянии на объект параметрических возмущений по внутреннему и внешнему каналам:  $T_p = 60$  сек,  $G = 49\%$  (рис. 4 крив. 3). Т.е. при номинальном режиме САР эффективна (рис. 4. крив. 2), но метод неэффективен при влиянии глубоких возмущений, т.к. значение перерегулирования не соответствует рекомендуемому до 25%. Таким образом, можно заключить, что САР нуждается в очередной процедуре адаптации.

#### Оценка вектора КЧХ системы с помощью ГСК

Ввод параметров объекта, регулятора:  $k_\mu = 55$   $T_\mu = 1,5$   $\tau = 52$   $k_p = 0,5$

$$T_i = 12$$

Период и амплитуда колебаний ГСК  $T_g = 10$   $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$   $\omega = 0,628$

Ввод числа периодов и числа точек на периоде  $m = 4$   $g = 1000$   $\Delta t = \frac{T}{g}$

Дискретное запаздывание  $\tau_d = \text{floor}\left(\frac{\tau}{\Delta t}\right)$   $A_x = 1$

Начальные условия:  $y_{1-\tau_d} = 0$   $y_{20} = 0$   $y_0 = 0$   $u_0 = 0$   $u_{i0} = 0$   $u_{p0} = 0$   $\varepsilon_0 = 0$

$n = m \cdot g$   $i = 0..n$   $t_i = \Delta t \cdot i$   $x_i = A_x \sin(\omega \Delta t \cdot i)$   $a = \frac{\Delta t}{T_\mu}$   $b = 1 - a$

$$\begin{pmatrix} y_{i+1+\tau_d} \\ y_{i+1} \\ y_{i+1} \\ \varepsilon_{i+1} \\ u_{i+1} \\ u_{p,i+1} \\ u_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \cdot k_\mu \cdot u_i + b \cdot y_{i+\tau_d} \\ a \cdot y_{i+1} + b \cdot y_{i+1} \\ a \cdot y_{i+1} + b \cdot y_{i+1} \\ x_i - y_i \\ k_p \cdot \frac{\Delta t}{T_i} \cdot \varepsilon_i + u_i \\ k_p \cdot \varepsilon_i \\ u_i + u_i \end{pmatrix}$$

Выделение последнего периода

$mout = m - 1$   $kmin = mout \cdot g$

$$a_x = \frac{2}{g} \cdot \sum_{i=kmin}^{kmin+g} \left( y_i \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{g}\right) \right)$$

$$a = -0,107$$

$$b_x = \frac{2}{g} \cdot \sum_{i=kmin}^{kmin+g} \left( y_i \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{g}\right) \right)$$

$$b = -0,051$$

$$\Phi = \frac{a + b \cdot j}{A_x} \quad A_x = |\Phi| \quad \gamma = \text{atan}\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$\varphi = \text{if}(a > 0, \gamma, \gamma - \pi)$$

Значения модуля и фазового сдвига вектора КЧХ:  $A = 0,118$   $\varphi = -2,7$

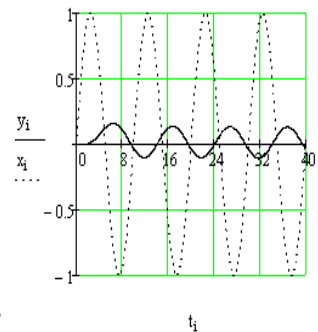


Рис. 1. Моделирование синусоидальных автоколебаний с помощью ГСК

К недостатку метода, по мнению авторов, можно отнести наличие специальной аппаратуры идентификации (ГСК), а также длительность самого процесса поиска идентификации и расчета оптимальных настроек. Также, если на систему во время активного эксперимента будут оказываться глубокие возмущения, шумы и помехи, то оценка математической модели может быть произведена со значительными погрешностями. Таким образом, ГСК может потребовать включения дополнительной

**Расчет оптимальных параметров регулятора при настройке с помощью ГСК, модель инерционное звено с запаздыванием**

Ввод модуля и фазы КЧХ системы, параметров регулятора, частоты

$$A_{\omega} := .118 \quad \phi := -2.7 \quad k_p := 5 \quad T_i := 12 \quad \omega := .628$$

Ввод безразмерных резонансной частоты и параметров настройки регулятора

$$\Omega_{res} := .794 \quad I_{opt} := 2.134 \quad K_{opt} := 2.194$$

Вычисление вектора КЧХ объекта  $\Phi_{\omega} = A \cdot e^{\phi j} \quad W_t := k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot \omega j} \right)$

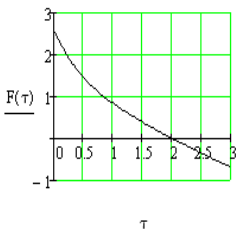
$$W_{\mu} := \frac{\Phi}{1 - \phi} \cdot \frac{1}{W_t} \quad p := \text{Re}(W_{\mu}) \quad q := \text{Im}(W_{\mu}) \quad A_{\mu} := |W_{\mu}| \quad A_{\mu} = 0.211$$

$$\gamma_{\mu} := \text{atan}\left(\frac{q}{p}\right) \quad \phi_{\mu} := \text{if}(p \geq 0, \gamma_{\mu}, \gamma_{\mu} - \pi) \quad \phi_{\mu} = -2.614$$

Приближенная оценка запаздывания модели по графику

$$\tau_{end} := 3 \quad n := 100 \quad \Delta\tau := \frac{\tau_{end}}{n} \quad \tau := \Delta\tau \cdot 2 \cdot \Delta\tau \cdot \tau_{end}$$

$$\beta := 3.5 \quad F(\tau) := -\tau \cdot \omega - \text{atan}(\beta \cdot \tau \cdot \omega) - \phi_{\mu} \quad \text{Точное решение}$$



$$\tau := 2.5$$

$$\tau_{mod} := \text{root}(F(\tau), \tau) \quad \tau_{mod} = 2.014$$

$$k_{mod} := A_{\mu} \left[ 1 + (\beta \cdot \tau_{mod} \cdot \omega)^2 \right]^5$$

$$k_{mod} = 0.959$$

Вычисление параметров регулятора и частоты ГСК на очередном шаге

$$k_{p,opt} := \frac{K_{opt}}{k_{mod}} \quad T_{i,opt} := I_{opt} \cdot \tau_{mod} \quad \omega_{opt} := \frac{\Omega_{res}}{\tau_{mod}}$$

$$\omega_{opt} = 0.394 \quad k_{p,opt} = 2.289 \quad T_{i,opt} = 4.298$$

Рис. 2. Программа расчета параметров ПИ – регулятора с помощью ГСК

дорогостоящей фильтрующей аппаратуры с адаптивными настройками. Отметим, что научная проблема разработки и реализации адаптивных фильтров до настоящего времени остается открытой.

**Интеллектуальный подход в адаптивном управлении**

Для повышения эффективности традиционных методов идентификации и адаптации САР, авторы предлагают использовать интеллектуальный подход в области управления. Анализ научных публикаций позволяет утверждать, что широкое распространение на зарубежных предприятиях получают регуляторы, реализующие алгоритмы аппарата нейронных сетей (НС) [5, 6]. Авторы предлагают использовать данный подход для оптимизации процессов адаптивного управления.

Проведем исследование процесса активной идентификации теплоэнергетического объекта регулирования (например, теплообменного аппарата в системе кондиционирования воздуха СКВ). На вход объекта подается единичный скачок, т.е. 10% изменения положения регулирующего органа. Следует отметить, расхождение во мнениях исследователей в плане длительности и величины скачка. Так, ряд авторов рекомендуют изменение в диапазоне 10-15% со временем наблюдения от 30 секунд до 3 минут [5, 6], по мнению авторов наиболее оптимальным будет воздействие минимально влияющее на

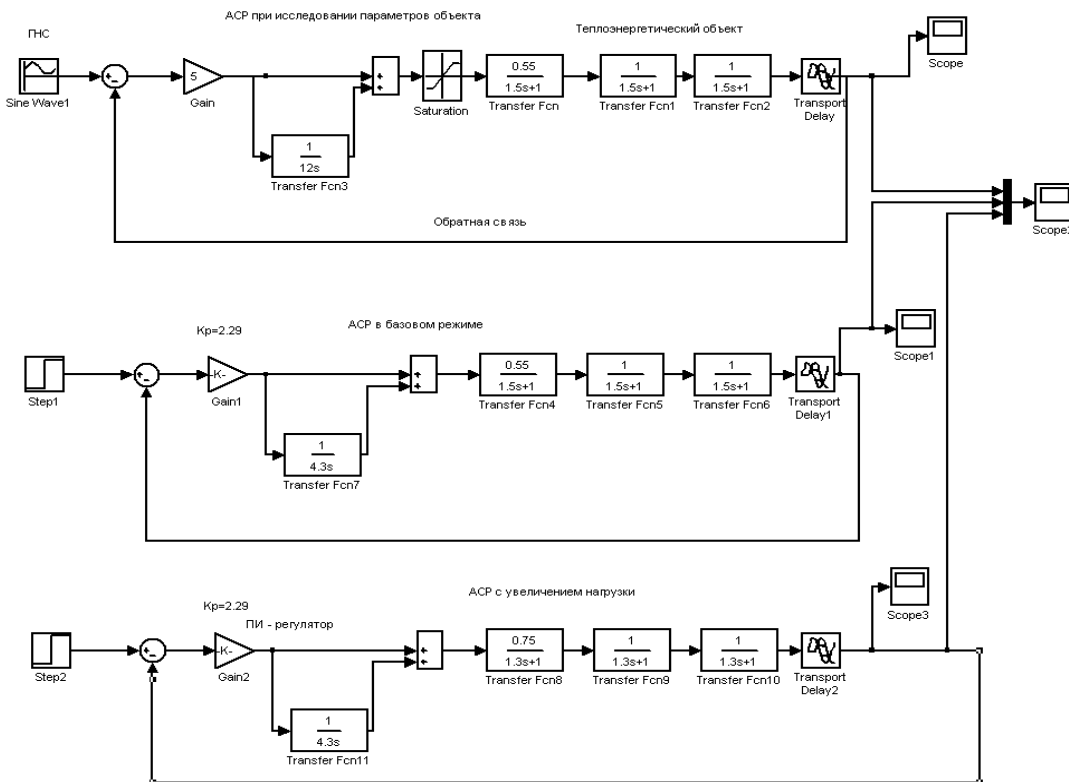


Рис. 3. Моделирование САР при влиянии параметрического возмущения

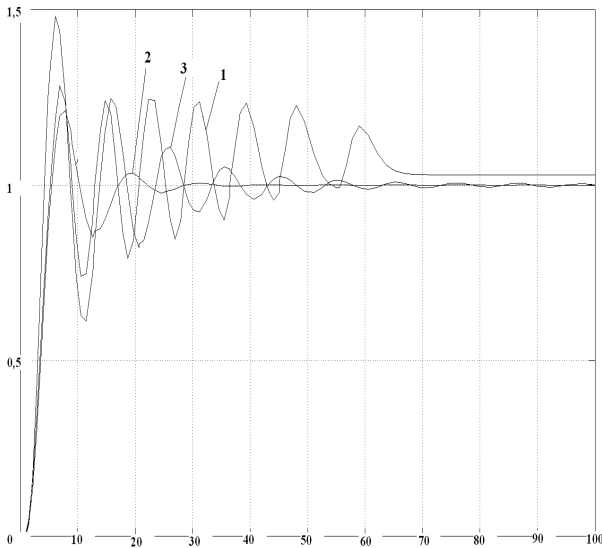


Рис. 4. Переходные процессы по каналу задания адаптивной САР, действующей с помощью ГСК: 1 – автоколебательный процесс с идентификацией, 2 – процесс по оптимальным настройкам, 3 – процесс при оптимальных настройках и влиянии параметрического возмущения

процесс управления. Такой подход может быть получен только при использовании современных интеллектуальных программных и технических средств. На предложенной авторами схеме (рис. 5) идентификация САР происходит после подачи единичного возмущения по каналу регулирования.

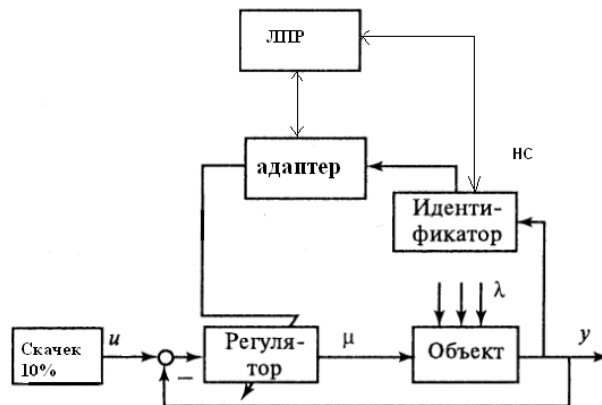


Рис. 5. Структура интеллектуальной САР

Идентификатор в виде обученной нейронной сети настроен на определения значений параметров объекта исследования (обучающая выборка семейства значений передаточных функций инерционных звеньев с запаздыванием). Наличие НС позволяет провести идентификацию зашумленного сигнала кривой разгона с минимальным временем и без повторных экспериментов. Далее информация о математической модели объекта поступает в адаптер (слой НС), который обучен определять оптимальные настройки ПИ и ПИД – регуляторов. Оператор или

лицо, принимающее решение (ЛПР), получает информацию от идентификатора и адаптера и может осуществить коррекцию алгоритма обучения или выборки.

Для апробации предложенной структуры был проведен компьютерный эксперимент по идентификации теплоэнергетического объекта (теплообменного аппарата) вида:  $W(s) = \frac{0,65}{5s+1} e^{-0,5s}$  и определения оптимальных настроек ПИ – регулятора (рис. 6). На канал регулирования (идентификации) накладывается помеха или внешний шум. Кривая разгона объекта показана на рис. 7.

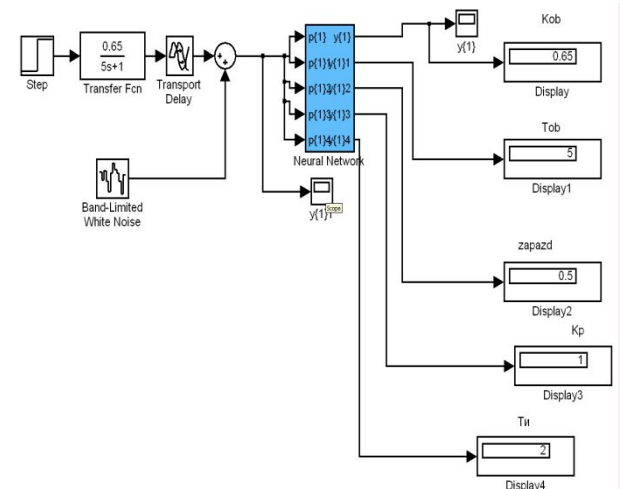


Рис. 6. Компьютерная модель нейросетевой системы идентификации и адаптации

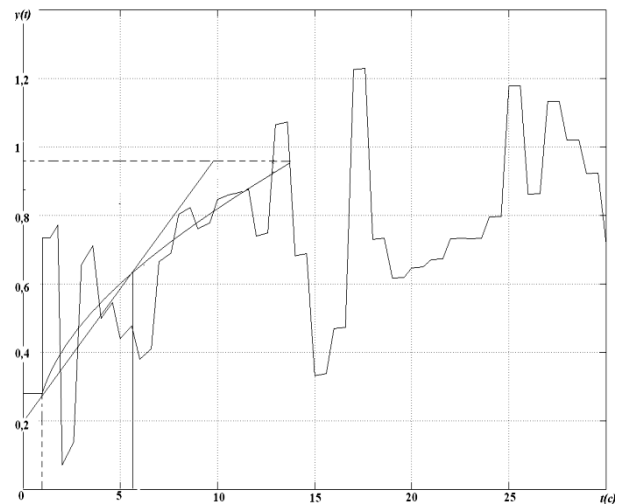


Рис. 7. Кривая разгона

Компьютерная модель предложенной НС представлена на рис. 8.

Для апробации рекомендуемых настроек  $K_p = 1$ ,  $T_i = 2$  ПИ – регулятора был проведен компьютерный эксперимент с введением дополнительного канала внешнего возмущения на выходе (рис. 9).

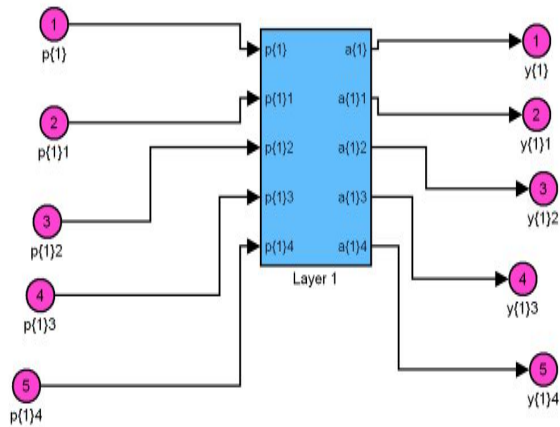


Рис. 8. Компьютерная модель НС

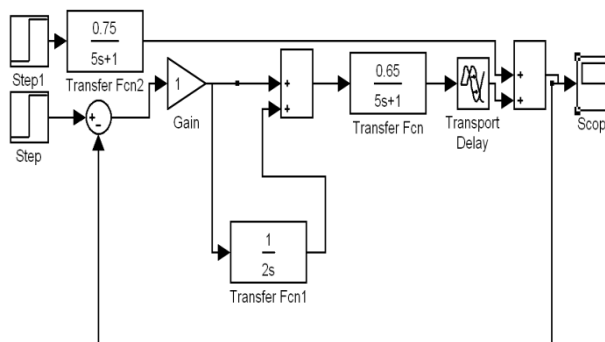


Рис. 9. Компьютерная модель с ПИ - регулятором

Апериодический переходный процесс  $T_p = 18$  с, показан на рис. 10. Дальнейшие эксперименты на робастность с введением параметрического возмущения (влияние нагрузки и других неопределенных внутренних возмущений) показали, что с учетом усредненной математической модели интеллектуальная адаптивная САУ обладает устойчивостью и эффективно компенсирует внешние и внутренние возмущения при варьировании параметров объекта в диапазоне 15 %.

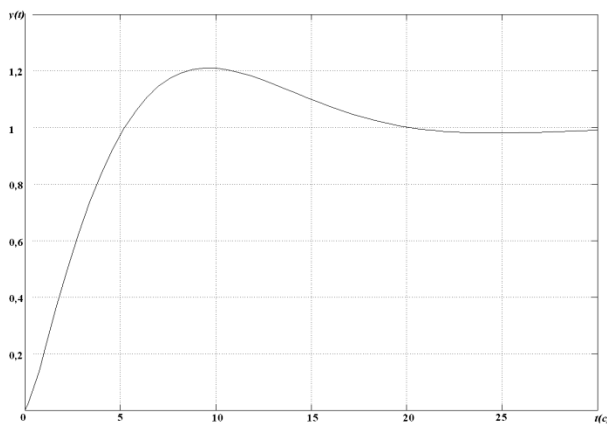


Рис. 10. Переходный процесс по каналу задания

## Заключение

Следует заметить, что наряду с указанными достоинствами нейросетевой подход обладает и рядом недостатков. Проблема заключается в том, что на обучение НС тратится достаточно много времени и при этом не всегда гарантируется результат. Также остается открытой задача создания оптимальной тестовой выборки и выбора функции активации. В ряде случаев выходные кодовые сигналы НС должны быть дополнительно идентифицированы. А при сильных производственных или измерительных шумах и помехах возникает необходимость в проведении большого числа экспериментов с целью усреднения или аппроксимации результирующей кривой разгона для последующего обучения НС.

Для повышения эффективности данного подхода, по нашему мнению, также необходимо использование приобретенных знаний опытного эксперта наладчика САУ и их реализация в виде правил нечеткой модели объекта. Это позволит упростить процедуры обучения НС и ускорить процесс идентификации параметров многорежимных объектов и адаптации САУ.

## Литература

1. Алгоритмы адаптации в системах управления энергоблоками [Текст] / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, В.П. Бутырев, В.Н. Солодовников // Теплоэнергетика. – 1979. – №26 (8). – С. 21-26.
2. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления [Текст] / В.Я. Ротач. – М.: МЭИ, 2008. – 396 с.
3. Клюев, А.С. Настройка систем автоматического регулирования котлоагрегатов [Текст] / А.С. Клюев, А.Г. Товарнов. – М.: Энергия, 1970. – 270 с.
4. Цыпкин, Я.З. Основы информационной теории идентификации [Текст] / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
5. Сигеру, О. Нейрокомпьютеры и их применение [Текст] / О. Сигеру, Х. Марзуки, Ю. Рубия; пер с англ. Н.В. Батина под. ред. А.И.Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: Изд. предприятие журн. "Радиотехника", 2000. – 272 с.
6. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети [Текст] / В.В. Круглов, В.В. Борисов // Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001 – 382 с.

Поступила в редакцію 2.11.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. інформаційних систем і мереж Н.А. Князева, Одеська національна академія пищевих технологій «ОНАПТ», Україна

### АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ МЕТОДІВ АДАПТАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТА ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

*В.С. Михайленко, Р.Ю. Харченко*

На основі аналізу одного з провідних традиційних методів адаптації систем автоматичного управління складних об'єктів, запропонований інтелектуальний підхід для вирішення задач вибору оптимальних настройок ПІ і ПІД регуляторів. Комп'ютерна апробація запропонованого підходу, а також процедури адаптації при визначенні оптимальних параметрів типових регуляторів забезпечує суттєве зниження інформаційної складності алгоритму пошуку оптимальних настройок регуляторів й поліпшення показників якості перехідних процесів. Як приклад реалізації, запропонований метод реалізовано програмним шляхом на САР пароперегрівача парового котла ТЕС по одному з основних каналів управління при впливі параметричних збурень в робочих режимах при заданих запасах стійкості, а також для САР системи кондиціонування. Результат показав адекватність роботи системи й можливість застосування методу для впровадження у виробництво.

**Ключові слова:** нейронна мережа (НМ), адаптація, генератор синусоїдальних коливань (ГСК), пароперегрівачі парового котла, параметричне збурення, теплообмінник СКВ.

### ANALYSIS OF THE TRADITIONAL METHOD ADAPTATION OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM AND DEVELOP THEM USING NEURAL NETWORKS

*V.S. Mikhailenko, R.Yu. Kharchenko*

Based on the analysis of one of the leading traditional ways of adapting automatic control of complex objects, there is provided an intelligent approach to solving problems of selection of an optimal setting PI and PID controllers. Computer approbation of the proposed approach, as well as adaptation procedure to determine optimal parameters of standard controls ensures a significant reduction in information complexity algorithm for optimal controller settings and improved quality of transients. As an example of the proposed method is implemented by software on ACS of superheater boiler thermal power plant, one of the main control channels under the influence of parametric perturbations in operating mode for a given stability margin, as well as ACS conditioning. The result showed the adequacy of the system and the possibility of applying the method to be implemented in production.

**Key words:** neural network (NN), adaptation, harmonic oscillator (GSK), the boiler superheater, parametric perturbation, exchanger CVS.

**Михайленко Владислав Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри, Одеська національна академія пищевих технологій «ОНАПТ», Одеса, Україна.

**Харченко Роман Юрьевич** – аспірант, ст. преподаватель, Одеська національна морська академія «ОНМА», Одеса, Україна, e-mail: romannn30@gmail.com.