



## АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТОВ НАСТРОЙКИ ПИ И ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СИСТЕМЫ

В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, С.В. Петров (МЭИ)

Рассматриваются примеры программ расчетов, которые приходится выполнять при настройке ПИ и ПИД-регуляторов по переходным характеристикам систем управления без их аппроксимации аналитическим выражением. Показана возможность получения подобных программ через Internet.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, оптимальная настройка, переходная характеристика, частотная характеристика, критерий оптимальности.

В [1] был рассмотрен метод настройки регуляторов по экспериментальной характеристике замкнутого контура системы автоматического регулирования, не требующий аппроксимации этой характеристики аналитическим выражением. Ниже на конкретных примерах показывается, какими алгоритмами и программами можно воспользоваться в этом случае при выполнении реальных расчетов. Программы взяты из учебника [2]. Они в "живом" виде продублированы в Internet на сайте кафедры АСУТП МЭИ <http://acswww.mpei.ac.ru> в разделе "Учебники и учебные пособия" в версии среды Mathcad, доступной для неподготовленного пользователя. Их можно скачать и пользоваться при аналогичных расчетах (естественно, с соответствующим изменением исходных данных).

Передачную функцию объекта регулирования зададим в следующем виде:

$$W_{об}(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (1)$$

(при  $k = 1$ ;  $T_1 = 7$  мин;  $T_2 = 1$  мин;  $\tau = 0,1$  мин), а передаточную функцию реального ПИД-регулятора:

$$R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right), \quad (2)$$

где  $k_i$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования,  $T_f$  – постоянная времени сглаживающего фильтра.

### Пример 1.

#### Эталонная настройка ПИ-регуляторов

Для сравнительного анализа эффективности предлагаемого метода настройки необходимо располагать графиком процесса регулирования при эталонной настройке регулятора, которая определяется по передаточной функции объекта (1). В общем случае расчет оптимальных параметров регулятора по критерию, содержащем в явном виде ограничение на запас устойчивости системы, состоит в построении границы области существования этого ограничения, а затем определении в ней точки минимума показателя точности работы системы. В частности, если запас устойчивости

оценивается частотным показателем колебательности  $M$ , а точность регулирования линейным интегральным критерием, эти операции могут быть выполнены с помощью программы *Internet 2004 пус.05-09* или *2008 пус.05-08*. Для типовых случаев разработаны более простые для практического применения методы, некоторые из которых будут использованы в дальнейшем.

При расчете параметров настройки ПИ-регуляторов (передаточная функция которых определяется формулой (2) при  $T_d = 0$ ) удобно воспользоваться методом, основанном на рассмотрении графика вспомогательной функции [2, 3]:

$$F(\omega) = \frac{-\omega M_{дон} [M_{дон} \sin \varphi_{об}(\omega) + 1]}{(M_{дон}^2 - 1) A_{об}(\omega)},$$

где  $A_{об}(\omega)$ ,  $\varphi_{об}(\omega)$  – амплитудная и фазовая частотные характеристики объекта. Первый положительный максимум этой функции  $F_{max}$  дает оптимальное значение коэффициента при интегральной составляющей алгоритма функционирования регулятора, а частота, при которой он имеет место, – резонансную частоту  $\omega_{res}$  собственных колебаний замкнутого контура системы. Оптимальное значение коэффициента передачи регулятора определяется формулой:

$$k_p^{opt} = - \frac{M^2 \cos \varphi_{об}(\omega_{крит})}{A_{об}(\omega_{крит})(M^2 - 1)}$$

и, следовательно, оптимальное значение постоянной времени интегрирования:

$$T_i^{opt} = \frac{k_p^{opt}}{F_{max}}.$$

Расчет может быть выполнен с помощью программы *Internet 2004 Пус.05-11* или *2008 Пус.05-10*. Оптимум настройки для  $M_{дон} = 1,55$  оказывается следующим:  $k_p^{opt} = 7,461$ ;  $T_i^{opt} = 3,866$  мин. График изменения регулируемой величины системы при такой настройке и ступенчатом единичном возмущении со стороны регулирующего органа показан на рис. 1 (кривая 1). Получен с помощью дискретной модели системы (*Internet 2004, Пус.05-08* или *2008, Пус.05-07*).

**Пример 2. Настройка ПИ-регуляторов по методу Циглера-Николса**

Настройка регуляторов рассматриваемым здесь методом вначале совпадает с настройкой по широко распространенному методу Циглера-Николса [4] (включение в работу регулятора с П законом регулирования) с тем лишь отличием, что такая система затем выводится не на границу устойчивости, а на границу аперiodичности. Определенный интерес поэтому представляет сравнение результатов этих двух методов.

Незатухающие колебания в системе с П регулятором с периодом колебаний  $T^{kr} = 1,9$  мин возникают при коэффициенте передачи  $k_p^{kr} = 80$  (использована предыдущая программа моделирования). В соответствии с формулами для оптимальных параметров настройки ПИ-регулятора по Циглеру – Николсу:  $k_p^{opt} = 0,45k_p^{kr}$ ;  $T_i^{opt} = T/1,2$  должны быть следующими:  $k_p^{opt} = 36$ ;  $T_i^{opt} = 1,583$  мин. Сравнение с эталонной настройкой показывает почти пятикратное завышение коэффициента передачи при уменьшенной примерно вдвое постоянной времени интегрирования. График переходной характеристики системы регулирования при такой настройке и прежних условиях показан на рис. 1, кривой 2. Как видим, настройка оказалась не только далекой от оптимальной, но вообще сделала систему неустойчивой.

**Пример 3. Настройка ПИ-регуляторов по рассматриваемому здесь методу**

Используя примененную в предыдущем примере дискретную модель системы с П регулятором, можно легко найти значение коэффициента передачи регулятора, при котором система будет находиться вблизи границы аперiodичности. Приемлемое с точки зрения решаемой здесь задачи будет значение  $k_p = 13$ , при котором переходная характеристика контура принимает слабоколебательный характер с периодом колебаний, примерно равным  $T = 5$  мин. Ее график приведен на рис. 2, а и 2, б (кривая  $h(t)$ ).

Имитация эксперимента по реализации входного воздействия в виде прямоугольных колебаний может быть выполнена расширением использовавшейся в предыдущем примере дискретной модели системы так, чтобы она моделировала сумму сдвинутых знакопере-

менных удвоенных переходных характеристик. На рис. 2, а показан результат такого суммирования для периода колебаний  $T = 5$  мин (частота  $\omega_1 = 1,257$  мин<sup>-1</sup>) при сдвиге каждого последующего слагаемого на половину периода колебаний ПХ  $\Delta t = 2,5$  мин. Кривая 1 получается при вычитании из переходной характеристики  $h(t)$  одной удвоенной, сдвинутой на 2,5 мин переходной характеристики, кривая 2 – то же при добавлении к кривой 1 сдвинутой относительно нее еще одной удвоенной переходной характеристики. Чтобы не затемнять графики дальнейший результат показан лишь при добавлении семи удвоенных знакопеременных ПХ (обозначен как 7), когда число периодов колебаний достигло четырех и выходная величина стала совершать незатухающее колебание.

Коэффициенты разложения в ряд Фурье первой гармоники этого колебания, вычисленные по графику последнего периода колебаний выходной величины, оказались следующими:  $a = 0,369$ ;  $b = -1,835$ . Соответственно модуль и фазовый сдвиг векторов комплексных частотных характеристик (КЧХ) замкнутого контура системы и объекта будут следующими:

$$A(\omega_1) = 1,474; \varphi(\omega_1) = -1,372; A_{об}(\omega_1) = 0,07; \varphi_{об}(\omega_1) = -2,487 \text{ (индексация производится так, что } \omega_2 > \omega_1 \text{)}.$$

Аналогичное построение для уменьшенного периода колебания до  $T = 3$  мин ( $\omega_2 = 2,094$  мин<sup>-1</sup>) показано на рис. 2, б, для которого расчеты дают следующие значения модуля и аргумента векторов КЧХ контура системы и объекта:  $A(\omega_2) = 0,593$ ;  $\varphi(\omega_2) = -2,655$ ;  $A_{об}(\omega_2) = 0,029$ ;  $\varphi_{об}(\omega_2) = -2,835$ .

Знание двух векторов КЧХ объекта позволяет методом интерполирования получить аналитическую модель объекта с четырьмя варьируемыми параметрами, например, такую:

$$W_{mod}(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(\beta \tau s + 1)^n}. \tag{3}$$

Значения коэффициентов этой модели, при которых ее КЧХ совпадает с КЧХ объекта (2) при частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , определяются решением уравнения:

$$\frac{b \arctan(x) - \arctan(bx)}{\ln\left(\frac{b^2 x^2 + 1}{x^2 + 1}\right)} - \frac{\varphi_{об}(\omega_2) - b\varphi_{об}(\omega_1)}{2 \ln\left(\frac{A_{об}(\omega_1)}{A_{об}(\omega_2)}\right)} = 0,$$

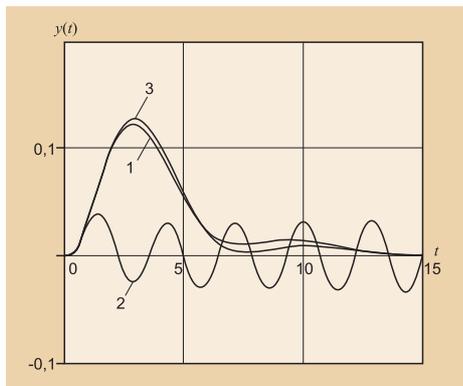


Рис. 1

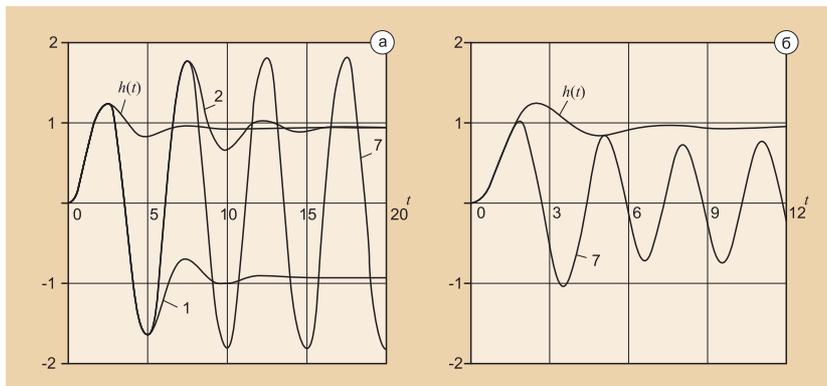


Рис. 2

где  $b = \omega_2/\omega_1$ . После того, как будет найдено его решение  $x = X$ , значения коэффициентов модели находят ся по формулам:

$$n = \frac{\varphi_2 - b\varphi_1}{b \arctg(X) - \arctg(bX)};$$

$$\Omega = -\varphi_1 - n \arctg(X); \tau = \frac{\Omega}{\omega_1};$$

$$\beta = \frac{X}{\Omega}; k = A_1(X+1)^{0,5n}.$$

Для выполнения этих расчетов можно воспользо ваться программой *Internet 2004 рис. 10-25* или *2008 рис. 10-22*; их результат:  $x = 3,01$ ,  $n = 1,845$ ;  $\beta = 16,711$ ;  $\tau = 0,143$ ;  $k = 0,589$ . На рис. 3 показаны КЧХ объекта (1) и модели (2); кружком и квадратиком на них обозначены точки с частотами  $\omega_1 = 1,257 \text{ мин}^{-1}$  и  $\omega_2 = 2,094 \text{ мин}^{-1}$ . Как видим, в существенном диапазоне частот эти харак теристики практически наложились друг на друга.

При настройке в производственных условиях КЧХ неизвестна, а известна лишь переходная характе ристика контура (рис. 2, кривая  $h(t)$ ). Поэтому для про верки правильности полученной модели с найденны ми коэффициентами целесообразно построить пере ходную характеристику модели, для чего можно при менить известный метод расчета по ее вещественной частотной характеристике. Соответствующая про грамма *Internet 2004 рис. 10-30* или *2008 рис. 10-26* да ет графики переходных характеристик, представлен ные на рис. 4 (1 – модель, 2 – объект); они оказались достаточно близкими друг к другу.

Расчет оптимальных параметров настройки ПИ-ре гулятора по полученной модели объекта выполнен тем же методом, что и расчет эталонных параметров. Резу лтат расчета:  $k_p^{opt} = 6,892$ ;  $T_i^{opt} = 3,467 \text{ мин}$ . График процес са регулирования при возмущении со стороны регули руемого органа приведен на рис. 1, кривая 3. Он практиче ски наложился на график эталонного процесса.

**Пример 4. Настройка идеализированных**

**ПИД-регуляторов по рассматриваемому здесь методу**

В публикациях обычно рассматривается идеали зированная версия ПИД-регулятора, когда в (3)  $T_f = 0$ . Целесообразно поэтому начать с рассмотре ния этого случая.

Вариант специализированного метода расчета мо жет основываться на требовании взаимной компен сации интегральной и дифференциальной составля ющих закона регулирования на частоте резонанса замкнутого контура системы [2]. Выбор оптимальных значений постоянных времени интегрирования и дифференцирования производится по формулам:

$$T_i^{opt} = -\frac{2}{\omega_{res} [1 + a^2(\omega_{res})] \varphi_{об}'(\omega_{res}) + \omega_{екв} a(\omega_{res})};$$

$$T_d^{opt} = \frac{1}{\omega_{res}} \left[ a(\omega_{res}) + \frac{1}{T_i^{opt} \omega_{res}} \right];$$

$$k_p^{opr} = \frac{M_{дон}}{\sqrt{M_{дон}^2 - 1} A_1(\omega_{res})};$$

где:  $a(\omega) = \text{tg} \left[ -\pi + \arcsin \frac{1}{M_{дон}} - \varphi_{об}(\omega) \right],$

$\varphi_{об}'(\omega_{res})$  – производная фазовой частотной характе ристики объекта,  $A_1(\omega)$  – амплитудная частотная харак теристика разомкнутого контура системы при еди ничном коэффициенте передачи регулятора.

Резонансная частота выбирается максимально возможной по условия сохранения замкнутым конту ром должного запаса устойчивости, причем поиск це лесообразно начинать от частоты, определяемой уравнением:

$$\varphi_{об}(\omega) + \pi - \arcsin \frac{1}{M_{дон}} = 0,$$

постепенно увеличивая ее и контролируя одно временно величину резонансного пика модуля КЧХ замкнутого контура.

В сравнительно редких случаях (при относительно большом запаздывании в контуре) показатель коле бательности превышает допустимую величину уже при частоте, определяемой уравнением (5). Подроб но вопрос о способе расчета в этом случае рассмат ривается в [2] издания 2008 г. Здесь на нем остано виться не будем.

Для расчетов по формулам (4), (5) можно вос пользоваться программами *Internet 2004 Рис. 5.15 – 5.18* или *2008 Рис. 5.14 – 5.17*). Результат расчетов на

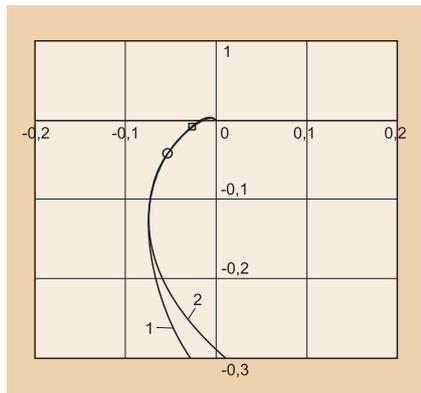


Рис. 3

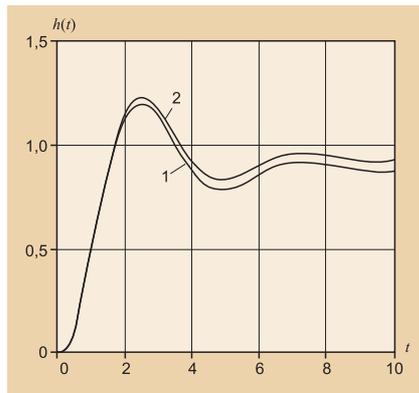


Рис. 4

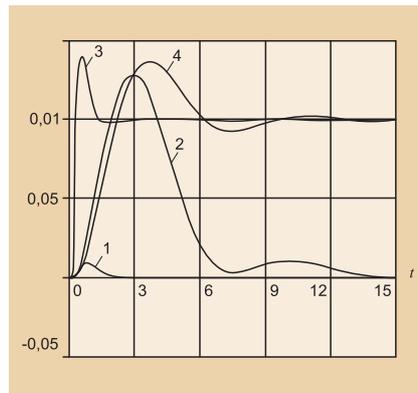


Рис. 5

*Ученый - это человек,  
который в чем-то почти уверен.*

Жюль Ренар

стройки по полученной выше модели объекта оказался следующим:  $k_p = 94,33$ ;  $T_i = 0,94$ ;  $T_d = 0,34$ . Моделирование процесса изменения регулируемой величины при такой настройке на объекте показано на рис. 5 кривой 1. Здесь же для сравнения показан взятый с рис. 1 аналогичный график процесса в системе с ПИ-регулятором (кривая 2). Как видим, переход от ПИ к ПИД-регулятору дал весьма существенный эффект. Здесь же приведены уменьшенные в 10 раз графики перемещения регулирующих органов (обозначены соответственно индексами 3 и 4), из рассмотрения которых следует, что эффект достигнут за счет более быстрого реагирования на изменение регулируемой величины ПИД-регулятора при практически одинаковом диапазоне перемещения регулирующего органа. Естественно, это обстоятельство должно быть учтено при выборе технических средств системы.

Полученный результат следует проверить повторением описанной выше процедуры адаптации, но только в системе с полученной и установленной в регуляторе настройкой регулятора. Ограничимся случаем настройки ПИД-регулятора, когда переходная характеристика замкнутого контура определяется кривой 3 на рис. 5.

Из этого графика следует, что период затухающих колебаний равен примерно 2 мин. На рис. 6,а показан полученный изложенным выше способом расчетный график реакции на прямоугольные колебания с этим периодом  $T_2 = 2$  мин ( $\omega_2 = 3,142$  мин<sup>-1</sup>), а на рис. 6, б – реакция на воздействие с вдвое большим периодом.  $\omega_1 = 1,572$  мин<sup>-1</sup>. Выделение первой гармоники колебаний дает следующие значения вектора КЧХ объекта:  $A_{об}(\omega_1) = 0,048$ ;  $\varphi_{об}(\omega_1) = -2,648$ ;  $A_{об}(\omega_2) = 0,014$ ;  $\varphi_{об}(\omega_2) = -3,11$  и модель (3) имеет следующие значения коэффициентов:  $n = 1,845$ ;  $\beta = 16,612$ ;  $\tau = 0,145$ ;  $k = 0,594$ . Они совпадают с ранее полученными, так что найденную настройку можно считать окончательной и дальнейший поиск оптимума прекратить.

**Пример 5. Настройка реальных ПИД-регуляторов по рассматриваемому методу**

Для расчета настройки реальных ПИД-регуляторов с передаточной функцией (2) может быть использована рассмотренная методика расчета идеализиро-

ванного регулятора, если обратить внимание, что путем эквивалентных преобразований система с реальным регулятором может быть заменена системой с виртуальным идеальным ПИД-регулятором, имеющим параметры настройки  $k_{pv}$ ,  $T_{iv}$ ,  $T_{dv}$ , и виртуальным объектом [2]:

$$W_v(s) = \frac{W_{об}(s)}{T_f s + 1} \tag{6}$$

При этом, исходя из конкретных эксплуатационных условий, должно быть задано значение коэффициента сглаживания флюктуаций регулируемой величины:

$$k_f = \frac{T_d}{T_f}$$

Начало расчета совпадает с расчетом идеализированного регулятора – определения начальных значений резонансной частоты и постоянной дифференцирования по формулам (4), (5), что позволяет задаться начальным значением постоянной времени фильтра:

$$T_f = \frac{T_d}{k_f}$$

и построить передаточную функцию виртуального объекта (6). После определения по этой передаточной функции рассмотренным выше порядком (по формулам (4), но с заменой в них модуля и фазы реального объекта на модуль и фазу виртуального) оптимальных параметров идеализированного виртуального регулятора  $k_{pv}$ ,  $T_{iv}$ ,  $T_{dv}$ , оптимальные параметры реального регулятора определяются по формулам:

$$k_p^{opt} = T_{iv}^{opt} - T_f; \quad T_i^{opt} = T_{iv}^{opt} - T_f;$$

$$T_d^{opt} = \frac{T_{dv}^{opt} T_{iv}^{opt}}{T_{iv}^{opt} - T_f} - T_f.$$

Так для  $k_f = 4$  формулы (4), (5) дают начальные значения постоянной времени дифференцирования и резонансной частоты:  $T_d = 0,317$  мин;  $\omega_{res} = 1,183$  мин<sup>-1</sup>, и следовательно, начальное значение постоянной вре-

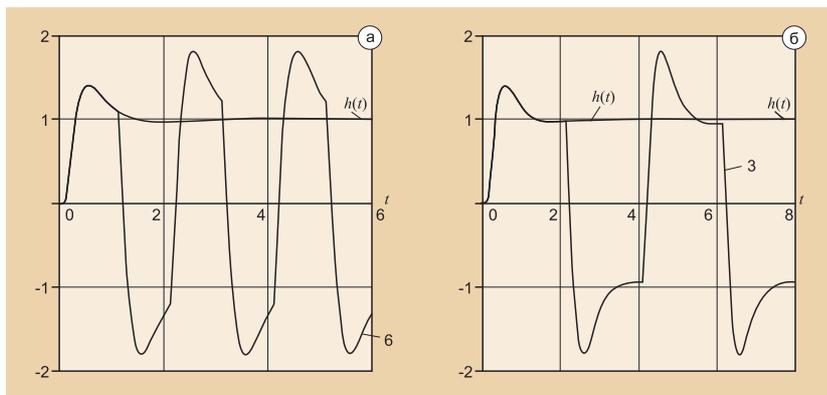


Рис. 6

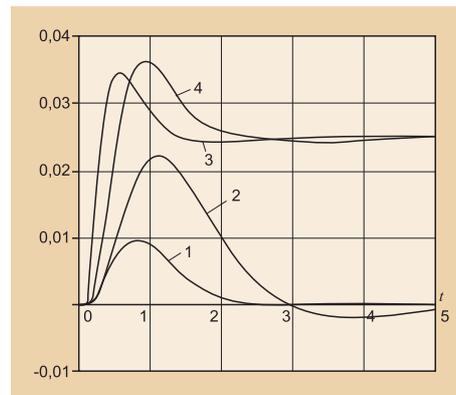


Рис. 7

мени фильтра может быть принято  $T_f = 0,079$  мин. Увеличение резонансной частоты оказалось возможным до  $\omega_{res} = 2,67$  мин<sup>-1</sup>, при котором оказалось  $T_d = 0,447$  мин, а значение  $k_f = 5,678$  превысило требуемое значение. Понадобилось увеличение постоянной времени фильтра. Окончательный результат поиска:  $T_f = 0,12$  мин;  $\omega_{res} = 2,3$  мин<sup>-1</sup> при настройке регулятора  $k_p = 37,1$ ;  $t_i = 1,06$  мин;  $T_d = 0,49$  мин. График процесса изменения регулируемой величины при ступенчатом возмущении со стороны регулирующего органа показан на рис. 7 (кривая 2), где для сравнения кривой 1 показан и соответствующий процесс в системе с идеализированным ПИД-регулятором (рис. 5). Кроме того, кривыми 3 и 4 показаны уменьшенные в 40 раз графики перемещения регулируемых органов (3 – в системе с идеализированным регулятором, 4 – с реальным). Для выполнения расчетов могут быть использованы программы *Internet 2004 Puc. 05.22 – 05.23* или *2008 Puc. 05.26 – 05.27*.

*Ротач Виталий Яковлевич – д-р техн. наук, проф., Кузицин Виктор Федорович – канд. техн. наук, доцент, Петров Сергей Викторович – инженер кафедры АСУ ТП Московского энергетического института (технического университета). Контактный телефон 8-499-7264680. E-mail: RotachVY@mail.ru*

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

**В.Р. Милов, Б.А.Суслов (НГТУ им. Р.Е. Алексеева),  
О.В. Крюков (ООО "Интермодуль")**

*Рассмотрены вопросы построения информационно-управляющих систем предприятий газовой отрасли. Предложен подход к построению гибридной интеллектуальной системы поддержки принятия решений.*

*Ключевые слова: Системы поддержки принятия решений, гибридные интеллектуальные системы, знания, нейронные сети.*

Принятие решений относится к важнейшему этапу управленческой деятельности, во многом определяющем ее эффективность. Для газовой отрасли решения по управлению предприятиями осуществляется в соответствии с многоуровневой структурой системы управления ОАО "Газпром" по следующим уровням [1]:

I уровень – Головная компания ОАО "Газпром" и высшее руководство дочерних обществ. На этом уровне осуществляется стратегическое управление, связанное с долгосрочным планированием и функционированием дочерних обществ в составе Группы "Газпром" (уровень стратегического управления);

II уровень – Администрация дочерних обществ. На данном уровне проводится планирование и оперативное управление производственно-хозяйственной деятельностью Обществ (уровень функционального управления);

III уровень – филиалы предприятия (линейно-производственные управления, сервисные подразделения). На этом уровне службами филиалов осуществляется управление и отражается оперативная деятельность филиалов (уровень оперативного управления).

Каждый из уровней управления характеризуется своим перечнем задач и проблем. Вопросы информационной поддержки процессов управления на различных уровнях становятся все более актуальными. Реше-

Если полученные результаты настройки ПИД-регулятора потребуют от последнего слишком большого, недоступного для осуществления на применяемых технических средствах быстродействия, их можно заглубить путем увеличения расчетного значения запаса устойчивости контура системы или увеличением постоянной времени сглаживающего фильтра.

### Список литературы

1. Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Петров С.В. Настойка регуляторов по переходным характеристикам систем управления без их аппроксимации аналитическими выражениями. // Автоматизация в промышленности.
2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательский дом МЭИ. 2004, 2006, 2007, 2008.
3. Ротач В.Я., Шавров А.В., Бутырев В.П. Синтез алгоритмов машинного расчета оптимальных параметров систем регулирования // Теплоэнергетика. 1977. № 12.
4. Ziegler J., Nichols N. Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the A.S.M.E, November, 1942.

ние задачи совершенствования корпоративного управления возможно лишь путем применения современных информационных технологий, создания систем поддержки принятия решений (СППР), интегрированных в единое информационное пространство компании.

### Информационно-управляющие системы предприятий газовой отрасли

Для удовлетворения информационных потребностей предприятия в формировании управленческих решений необходимо располагать соответствующими источниками исходных данных, на основе которых может быть получена необходимая аналитическая информация. Это предопределяет ряд новых требований к информационным системам, являющимся основой систем управления предприятием. Так, при проектировании и разработке информационных систем предприятия газовой отрасли целесообразно учитывать:

- иерархический характер организационных структур предприятия;
- принцип иерархической соподчиненности задач управления;
- условия оптимального распределения функций управления между организационными уровнями;