

5. *Годин А.В.* Стабилизатор с микроконтроллерным управлением 120–270 вольт (6 ступеней) с точностью на выходе 205-235 вольт для активно-индуктивной нагрузки до 6 кВт. – Приложение к статье В.Я. Володина «Компенсатор отклонения напряжения сети» // Радио Хобби. – 2004. – № 1.
6. [www.Ntpo.com/electronics](http://www.Ntpo.com/electronics).

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Г.В. Горелова

**Пашаев Ариф Мир Джалал оглы** – Национальная авиационная академия Азербайджана; e-mail: [rasimnabiyeu@yahoo.com](mailto:rasimnabiyeu@yahoo.com); AZ-1045, г. Баку, Бина 25-й км; тел.:+994124972829; д.ф.-м.н.; профессор; академик Национальной академии наук Азербайджана; ректор Национальной авиационной академии Азербайджана.

**Набиев Расим Насиб оглы** – тел.:+994124972632; д.т.н., нач. отд. авиационной электроники НИИ ТАП Национальной академии авиации Азербайджана.

**Гараев Гадир Исахан оглы** – аспирант.

**Pashayev Arif Mir Djalal ogly** – Azerbaijan National Aviation Academy; e-mail: [rasimnabiyeu@yahoo.com](mailto:rasimnabiyeu@yahoo.com); AZ-1045, Baku, Bina 25th km; phone: +994124972829; dr. of eng. sc.; professor, Academician of the National Academy of Sciences of Azerbaijan; rector of Azerbaijan National Aviation Academy.

**Nabiyeu Rasim Nasib ogly** – phone: +994124972632; dr. of eng. sc.; head of Aviation Electronics department of Institute of National Aviation Academy of Azerbaijan.

**Garayev Gadir Isaxan ogly** – graduate student.

УДК 681.51:518.5

**Т.А. Пьявченко**

### **РЕГУЛЯТОР БЕЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

*В работе обосновывается необходимость применения компенсирующей обратной связи, охватывающей ПИ регулятор. Цель применения этой обратной связи заключается в устранении в регуляторе дифференциальной составляющей и значительном улучшении показателей качества управления по сравнению с ПДД и ПИДД<sup>2</sup> алгоритмами. Для подтверждения выдвинутого тезиса рассматривается тот же пример, что и для указанных алгоритмов. Преимущества предлагаемого устройства управления по надежности и экономической эффективности становятся ещё более очевидными при его реализации в микроконтроллере, поскольку позволяет легко подстраиваться под любой объект управления, не требует усилителя мощности в исполнительном блоке и ослабляет износ механических частей системы благодаря отсутствию колебаний в переходном процессе.*

*Микроконтроллер; компенсирующая обратная связь; улучшение показателей качества; повышение надежности и экономической эффективности.*

**Т.А. Pyavchenko**

### **REGULATOR WITHOUT THE DERIVATIVE COMPONENT FOR CONTROL OF THE INDUSTRIAL OBJECTS**

*Necessity of application of a compensating feedback for the Pi-regulator is proved in work. The purpose of application of this feedback consists in elimination in a regulator of a derivative component and considerable improvement of indicators of quality of control in comparison with PDD and PIDD<sup>2</sup> algorithms. For acknowledgement of the put forward thesis the same example, as for the specified algorithms is considered. Advantages of an offered control device on reliability*

and economic efficiency become even more obvious at its realization in the microcontroller, as it allows to be arranged easily under any control object, does not demand of the power amplifier in the executive block and weakens deterioration of properties of mechanical parts of system thanks to absence of fluctuations in transient.

*Microcontroller; compensating feedback; improvement of indicators of quality; increase of reliability and economic efficiency.*

Поскольку промышленные объекты и, следовательно, их математические модели всё усложняются, применение обычных стандартных ПИ, ПИД законов управления не обеспечивает не только требуемых показателей качества, но и устойчивости системы. Эти причины объясняют появление таких регуляторов, как ПДД<sup>2</sup>, ПИДД<sup>2</sup> [1]. При этом даже сами авторы указанной работы констатируют отрицательные стороны реализации дифференциальной составляющей: расширение полосы пропускания, из-за чего сказываются высокочастотные помехи на работу системы, и появление собственных ошибок в силу невозможности точно воспроизвести первую производную и, уж тем более, производные второго порядка.

В настоящей работе предлагается использовать в регуляторах коррекцию в виде обратной связи, повторяющей модель объекта управления (ОУ) и охватывающей регулятор. Если модель ОУ [2] состоит из нескольких типовых звеньев, возможно, и звена запаздывания, то, очевидно, особенно для моделей промышленных объектов, можно выделить инерционное звено с параметрами, существенно влияющими на качество процесса управления. Среди них можно указать коэффициент передачи ОУ  $K_{оу}$  и наибольшую по величине постоянную времени  $T_{оу}$ . Назовем это звено основным с передаточной функцией

$$W_{осн}(s) = \frac{K_{оу}}{T_{оу}s + 1}. \tag{1}$$

При этом модель ОУ может быть представлена как произведение 2-х передаточных функций  $W_{осн}(s)$  и  $W_{доп}(s)$ , где  $W_{доп}(s)$  – передаточная функция остальных звеньев модели, названных дополнительными.

Чтобы оценить влияние компенсирующей обратной связи (КОС), представим структурную расчетную схему замкнутой системы (рис. 1) и для неё получим передаточную функцию разомкнутой системы  $W(s)$ , разорвав главную обратную связь в точке А.

Передаточная функция разомкнутой системы (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} W(s) &= W_{рег}(s) \cdot (W_{осн}(s) \cdot W_{доп}(s) + W_{осн}(s) - W_{осн}(s) \cdot W_{доп}(s)) = \\ &= W_{рег}(s) \cdot W_{осн}(s). \end{aligned} \tag{2}$$

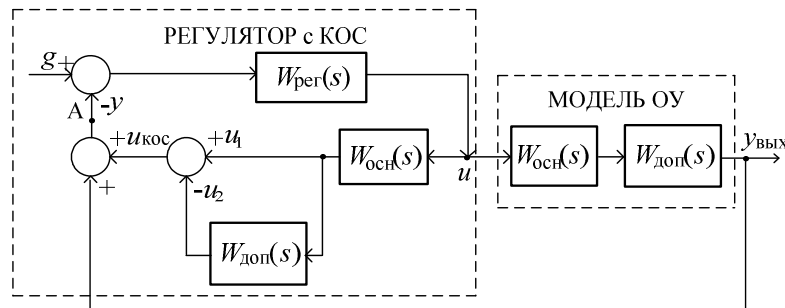


Рис. 1. Структурная расчетная схема замкнутой системы управления

Из выражения (2) следует: показатели в системе управления с компенсирующей обратной связью в регуляторе (см. рис. 1) определяются типом регулятора, его параметрами и параметрами основного звена (1). Поскольку передаточная функция (1) является моделью инерционного звена 1 порядка, то в качестве регулятора достаточно в этой системе взять ПИ-регулятор, параметры настройки которого будут определять показатели качества процесса управления. При этом порядок характеристического уравнения замкнутой системы будет равен 2, а это значит, что можно обеспечить технически оптимальный переходный процесс с переуправлением не более 5 %, выбирая частоту среза  $\omega_{cp}$ , соответствующую заданному запасу по фазе  $\Delta\varphi_{cp}$  [3].

Для сокращения времени переходного процесса необходимо выбирать постоянную времени интегрирования в регуляторе

$$T_u = 0,6 \cdot T_{oy}. \quad (3)$$

Из (2) с учётом (1) и (3) следует получить комплексный коэффициент передачи (ККП) разомкнутой системы (см. рис. 1), а именно

$$W(j\omega) = \frac{K_{pez} \cdot K_{oy} \cdot (0,6 \cdot T_{oy} j\omega + 1)}{0,6 \cdot T_{oy} j\omega \cdot (T_{oy} j\omega + 1)}. \quad (4)$$

Далее для определения второго параметра настройки регулятора  $K_{рег}$  необходимо воспользоваться частотным критерием Найквиста, в соответствии с которым на частоте среза модуль комплексного коэффициента передачи (4) равен 1, а запас по фазе  $\gamma_{cp}$  должен задаваться в пределах  $60^\circ - 80^\circ$  [4, 5]. Поэтому, записав в соответствии с (4) выражение для фазочастотной характеристики разомкнутой системы (см. рис. 1) и приравняв его к значению фазы на частоте среза, можно найти величину  $\omega_{cp}$ .

$$\varphi(\omega_{cp}) = -\frac{\pi}{2} + \arctg(0,6 \cdot T_{oy} \omega_{cp}) - \arctg(0,6 \cdot T_{oy} \omega_{cp}) = -\pi + \gamma_{cp}, \quad (5)$$

а из выражения для модуля ККП

$$A(\omega_{cp}) = \frac{K_{pez} \cdot K_{oy} \cdot \sqrt{0,36 \cdot T_{oy}^2 \omega_{cp}^2 + 1}}{0,6 \cdot T_{oy} \omega_{cp} \cdot \sqrt{T_{oy}^2 \omega_{cp}^2 + 1}} = 1$$

получить выражение для второго коэффициента настройки регулятора – его коэффициента передачи

$$K_{pez} = \frac{0,6 \cdot T_{oy} \omega_{cp} \cdot \sqrt{T_{oy}^2 \omega_{cp}^2 + 1}}{K_{oy} \cdot \sqrt{0,36 \cdot T_{oy}^2 \omega_{cp}^2 + 1}}. \quad (6)$$

Оценку влияния компенсирующей обратной связи на показатели качества процесса управления выполним для примера, взятого из источника [1], в котором управление объектом с передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)^2} e^{-s\tau_o}; \quad (7)$$

$$K_o = 0,37; \tau_o = 12 \text{ c}; T_1 = 91,8 \text{ c}; T_2 = 55,8 \text{ c}$$

осуществляется с помощью многопараметрического ПИДД<sup>2</sup> регулятора.

В основной передаточной функции (1) примем:  $K_{oy} = K_o$ ,  $T_{oy} = T_o$ . Воспользовавшись пакетом Editor системы Mat Lab (см. приложение) для формул (5) и (6) при запасе по фазе  $\gamma_{cp} = 75^\circ$ , получили  $\omega_{cp} = 0,0136 \text{ рад/с}$  и  $K_{рег} = 4,3199$ .

Проверка показателей качества процесса управления была выполнена путем моделирования замкнутой системы с регулятором, охваченным КОС, и объектом управления (7) в пакете Simulink системы Mat Lab (рис. 2). При этом предварительно были вычислены коэффициенты цифровых блоков управляющего устройства, для чего был выполнен переход от аналогового инерционного звена к цифровому в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\frac{K}{Ts + 1} = \frac{Y(s)}{X(s)} \rightarrow \frac{bz}{z - a} = \frac{Y(z)}{X(z)}, \quad b = \frac{K \cdot \Delta t}{T + \Delta t}, \quad a = \frac{T}{T + \Delta t}.$$

Шаг дискретности по времени, как известно, выбирается в соответствии с динамикой объекта, а при наличии звена запаздывания – из соотношения  $\Delta t = \tau / 6$ , в выбранном примере его величина будет равна 2 с. При этом следует не забывать, что эта величина должна быть установлена в окне “Sample time” всех блоков цифрового устройства управления (см. рис. 2).

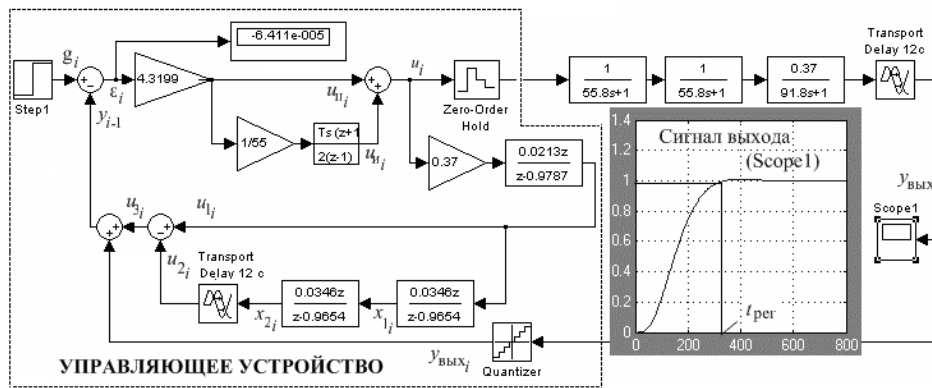


Рис. 2. Структурная схема модели системы управления с КОС в регуляторе

Сравнивая результаты моделирования (см. Score 1 на рис. 2) с данными, полученными в [1], видим, что наличие компенсирующей обратной связи в регуляторе устраняет колебания в переходном процессе и почти в 2 раза (с 600 до 320 секунд) сокращает его длительность. Алгоритм работы такого управляющего устройства в виде системы разностных уравнений (8) легко программируется в любом микроконтроллере [6].

В системе разностных уравнений (8) приняты следующие обозначения:  $\Delta t$  – шаг дискретности по времени или "Ts" в системе Mat Lab,  $T_{осн}$ ,  $T_{доп}$  – постоянные времени основного и дополнительного инерционных звеньев (в передаточной функции (7) это  $T_1$  и  $T_2$  соответственно). Остальные обозначения либо имеют пояснения ранее, либо ясны из структурной схемы модели (см. рис. 2). В соответствии с этим алгоритмом последовательно в микроконтроллере вычисляются: сигнал рассогласования  $\epsilon_i$ , код управляющего воздействия  $U_i$  и код корректирующей обратной связи  $u_{3i}$  при нулевых начальных условиях. Количество вычислений  $n$  определяется требуемой длительностью работы системы.

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_i &= g_i - y_{i-1}, \\
 u_{ni} &= \varepsilon_i \cdot K_{pez}, \\
 u_{ummi} &= u_{ummi(i-1)} + K_{pez} \cdot \frac{\Delta t}{T_u} \cdot \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2}, \\
 u_i &= u_{ni} + u_{ummi}, \\
 u_{1i} &= a_0 u_{1(i-1)} + b_0 u_i, \quad a_0 = \frac{T_{oy}}{T_{oy} + \Delta t}, \quad b_0 = \frac{K_{oy} \Delta t}{T_{oy} + \Delta t}, \\
 x_{1i} &= a_1 x_{1(i-1)} + b_1 u_{1i}, \quad a_1 = \frac{T_{don}}{T_{don} + \Delta t}, \quad b_1 = \frac{\Delta t}{T_{don} + \Delta t}, \\
 x_{2i} &= a_2 x_{2(i-1)} + b_2 x_{1i}, \quad a_2 = a_1, \quad b_2 = b_1, \\
 u_{2i} &= x_{2(i-k)}, \quad k = \frac{\tau}{\Delta t}, \\
 u_{3i} &= u_{1i} - u_{2i}, \\
 y(0) &= u_{ummi}(0) = u_1(0) = x_1(0) = 0, \\
 x_2(j) &= 0, \quad j = \overline{1, k}, \\
 i &= \overline{1, n}.
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Структурная схема системы управления с микроконтроллерным управляющим устройством представлена на рис. 3.

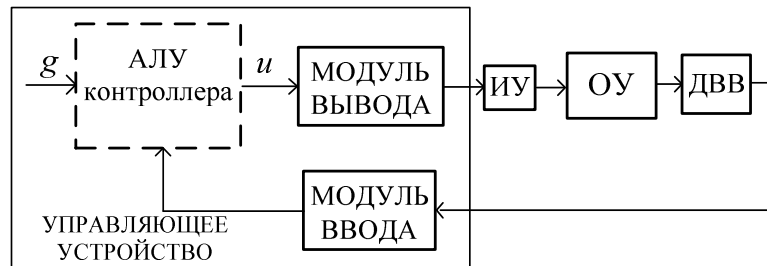


Рис. 3. Структурная схема системы управления с микроконтроллерным управляющим устройством

В качестве микроконтроллера, как уже отмечалось, может быть использован любой недорогой микроконтроллер, например, из серии приборов, выпускаемых фирмой НИЛ АП [7], в котором модуль ввода, подключаемый к датчику выходной величины (ДВВ), имеет аналоговый фильтр низких частот и интегрирующий АЦП, повышающие помехозащищенность системы. В модуль вывода встроен широтноимпульсный преобразователь (ШИП) для преобразования кода управления в ширину импульсов. При этом в качестве исполнительного устройства (ИУ) может быть взято твердотельное реле, подключающее питание к сервоприводу либо к нагревателю в виде керамических резисторов, если объектом управления является процесс нагрева [3].

Среди объектов, для управления которыми может использоваться предлагаемый регулятор, могут быть объекты теплоэнергетики, металлургической промышленности, коммунального хозяйства, приводы в станках ЧПУ, в роботах и т.п.

В заключение отметим, что предлагаемое устройство управления в виде ПИ-регулятора, охваченного корректирующей обратной связью, несложно в применении при микропроцессорной реализации, дает результаты, отвечающие критерию технического оптимума [8] с нулевой статической ошибкой. При этом время расчетов незначительно, так как не требует многих итераций, как в описанном в работе [1] алгоритме. Новизна предлагаемого в настоящей работе метода заключается в построении ПИ-регулятора с КОС, представляющей собой модель объекта управления с компенсацией запаздывания и малозначимых полюсов для улучшения динамических свойств системы. Кроме того, необходимо указать на такие преимущества микропроцессорной реализации управляющего устройства, как повышение надежности и его экономическую эффективность, во-первых, благодаря легко подстраиваемой программе для любого объекта управления, во-вторых, наличие ШИП в модуле вывода избавляет систему от дополнительного усилителя мощности в исполнительном устройстве.

#### **Приложение**

m-файл вычисления частоты среза и коэффициента передачи ПИ-регулятора  
 $G_{cp}=1.309$ ;  $T_{ou}=91.8$ ;  $K_{ou}=0.37$ ;  
syms  $W_{cp}$   
 $[W_{cp}]=\text{solve}(\text{atan}(0.6*W_{cp})-\text{atan}(T_{ou}*W_{cp})+(\pi/2)-G_{cp}) \% W_{cp}=0.0136$ ;  
 $K_{reg}=T_{ou} * W_{cp} / K_{ou} * \text{sqrt}((T_{ou}^2 * W_{cp}^2 + 1) / (0.36 * T_{ou}^2 * W_{cp}^2 + 1)) \% K_{reg}=4.3199$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.* Структурная реализация и оптимальная настройка многопараметрического ПИД<sup>2</sup> регулятора с реальным дифференцированием // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – № 11. – С. 34-39.
2. *Пьявченко Т.А.* Метод идентификации промышленного объекта по его временной и частотной характеристикам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 216-219.
3. *Пьявченко Т.А., Моисеева Е.В.* Математический метод синтеза алгоритма управления с использованием частотных критериев на основе данных натурального эксперимента // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (116). – С. 93-100.
4. *Пьявченко Т.А.* Расчет параметров ПИД закона управления для объектов с транспортным запаздыванием // Известия ТРТУ. – 2006. – № 5 (60). – С. 83-88.
5. *Пьявченко Т.А., Карась В.М.* Расчет параметров настройки регуляторов для сложных объектов с транспортным запаздыванием // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – №1 (102). – С. 41-47.
6. *Пьявченко Т.А., Карась В.М.* Алгоритмы цифрового управления процессом горения в топке парогенератора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 2 (91). – С. 148-154.
7. <http://www.RLDA.ru> (дата обращения 03.12.11).
8. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Пьявченко Тамила Алексеевна** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: [pta@tsure.ru](mailto:pta@tsure.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79185139107; кафедра систем автоматического управления; профессор.

**Ryavchenko Tamila Alexeevna** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pta@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185139107; the department of automatic control systems; professor.

УДК 681.58:621.865.8

**И.О. Шаповалов**

### **ПРИМЕНЕНИЕ ГРУПП МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В СЛОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧАХ**

*Рассматривается возможность использования групп транспортных роботов при постройке понтонных мостов. Ставится задача сборки моста из отдельных секций с помощью группы автономных мобильных роботов. Обсуждаются наиболее популярные методы проектирования систем группового управления роботами. Предлагается реализация взаимодействия роботов группы с помощью виртуальных агентов и потенциальных полей. Приводится динамическая модель системы управления движением. На основе приведенной модели строится алгоритм управления перемещением отдельных секций по заданным траекториям. Приводятся результаты численного моделирования, подтверждающие работоспособность предложенного метода управления перемещением.*

*Группа роботов; понтонный мост; строй; перемещение; взаимодействие.*

**I.O. Shapovalov**

### **MOBILE ROBOT GROUP USING IN COMPLEX TRANSPORT PROBLEMS**

*The possibility of transport robot group using in pontoon bridge building is considered in this paper. Problem of separate section assembling into bridge by the autonomous mobile robot group is stated. Popular methods of group robot control system designing are discussed. Robot collaboration realization through virtual agents and potential fields is suggested. Dynamics of relocation control system are given. Control algorithm of separate sections motion along given paths is designed on the base of given dynamics. Results of modeling approving efficiency of suggested method are given.*

*The robot group; the pontoon bridge; formation; relocation; collaboration.*

В последнее время в научной литературе огромное внимание уделяется изучению проблем группового управления роботами. Это связано с тем, что группы роботов обладают значительными преимуществами по сравнению с одиночными роботами. Если же сравнивать различные типы систем группового управления между собой, то наиболее перспективными выглядят децентрализованные системы управления интеллектуальными роботами. В таких системах роботы рассматриваются как автономные агенты, самостоятельно, без внешних управляющих воздействий решающие поставленные перед ними задачи путем взаимодействия друг с другом и окружающей средой.

Одной из проблем, при разрешении которой могут быть реализованы преимущества, присущие группам роботов, является сборка конструкций типа понтонных мостов. В нашем государстве с его многочисленными реками имеется постоянная потребность в создании гибких и дешевых мостовых конструкций, предназначенных для временного использования как в гражданских, так и в военных целях. Создание понтонных мостов из совокупности отдельных секций является комплексной транспортно-сборочной задачей, требующей применения сложных технических средств и их координации. Решение этой задачи еще более усложняется при необходимости ее решения в экстремальных условиях с жесткими вре-