

## УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ

УДК 681.5

Н.Н. Гурский, Ю.И. Слабко, Р.И. Фурунжиев, А.Л. Хомич

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ РЕГУЛЯТОРОВ  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ

*Обсуждаются состояние и перспективы использования адаптивных регуляторов для управления системами. Рассматриваются новый подход и технология синтеза управлений для класса адаптивных систем управления по заданным критериям в общем случае, когда и динамическая система, и критерий являются нелинейными. В качестве критерия рассматриваются заданные свойства движения выходной переменной управляемой системы.*

**Введение**

Сегодня в мире эксплуатируются миллионы промышленных регуляторов, а с учетом бытовой сферы счет идет на миллиарды. Поэтому даже незначительное на первый взгляд улучшение качества управляемого процесса может дать существенный эффект. Основная масса регуляторов независимо от того, где они установлены, решают задачи поддержания заданной величины (задачи стабилизации) либо изменения ее в соответствии с заданными требованиями (задачи типа слежения). Выполнять свои функции регулятор может только в том случае, если удастся измерять управляемую переменную, но одного этого недостаточно: надо еще иметь возможность воздействовать на эту переменную. Оба эти условия кратко формулируются так: объект должен быть наблюдаемым и управляемым.

Различные датчики преобразуют управляемую переменную в электрические сигналы. Для управления в состав объекта включают исполнительные механизмы. Они приводят в действие регулирующие органы, которые непосредственно воздействуют на управляемый процесс. Датчик, исполнительный механизм и средства формирования желаемых свойств движения (например, задающее устройство, с помощью которого устанавливается нужное значение управляемой переменной) – все это «периферия» регулятора. В «базовой части» регулятора сосредоточен его интеллект. В простейшем случае сигнал, поступающий от датчика, сравнивается с эталонной величиной (в общем случае – с желаемыми свойствами движения) и формируется рассогласование (ошибка), которое подвергается обработке для получения управляющего сигнала. В особенности этой обработки и заключается своеобразие регуляторов. Вопрос о том, каков должен быть алгоритм регулятора, – один из центральных в теории и практике автоматического управления.

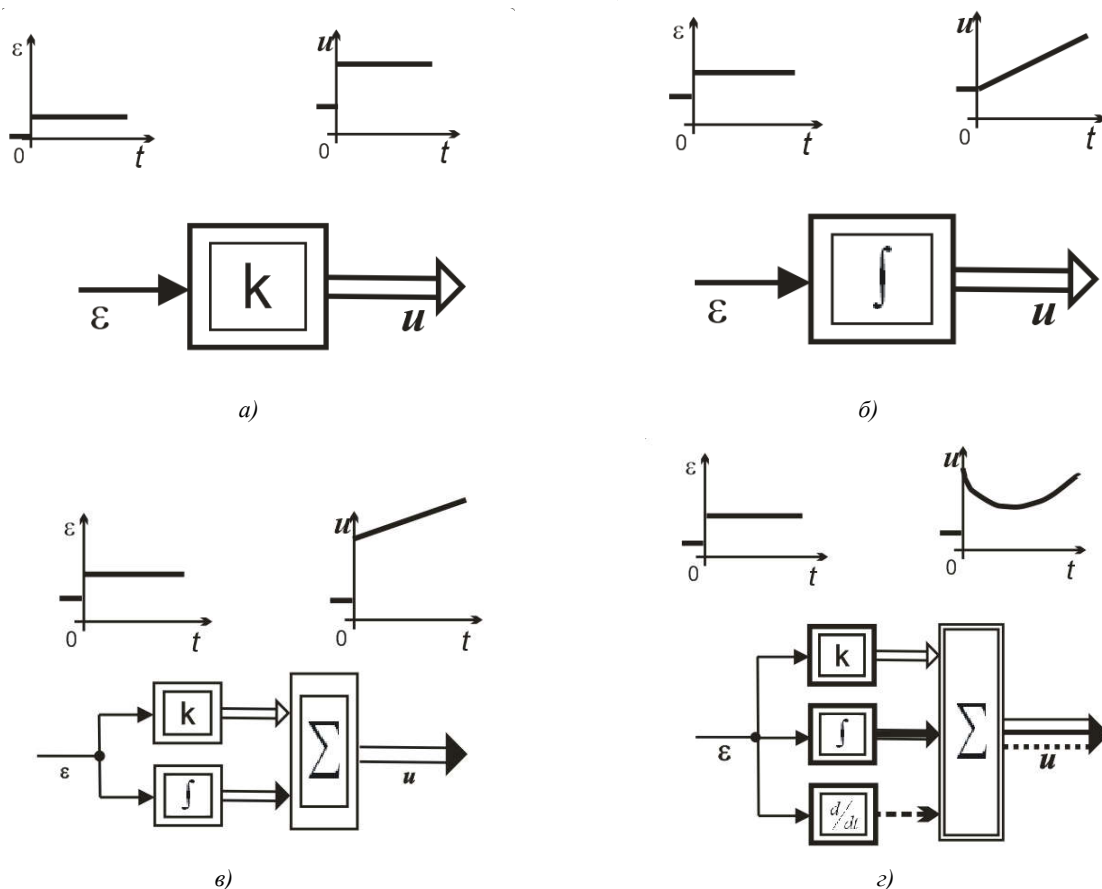
**1. Классические регуляторы**

Важнейшие характеристики регулятора, определяющие качество его работы, это точность и быстродействие. На заре автоматического управления поиски компромисса между стоимостью создания алгоритмов и конструкций регуляторов привели к созданию пропорционально-интегрально-дифференциального закона управления (ПИД-регулятора), который, в сущности, выполняет операции умножения, интегрирования и дифференцирования.

Обнаружив на своем входе рассогласование, усилитель регулятора в первый момент перемещает исполнительный механизм быстро, но строго дозированно, компенсируя значительную часть рассогласования. Интегратор медленно, чтобы не проскочить желаемую величину, приближает регулируемый параметр к заданному значению. Дифференциатор, реагирующий на скорость изменения рассогласования, форсирует работу регулятора в тех случаях, когда управляемая переменная начинает быстро отклоняться от требуемой величины (рис.).

Благодаря ПИД-регулятору был достигнут удачный компромисс между качеством управления и сложностью регулятора, а значит, и его ценой. ПИД-регулятор в мире автоматического

управления стал своеобразной классикой. Путем манипуляции тремя параметрами регулятора, изменяющими удельный вес составляющих П, И, Д в законе управления, можно обеспечить его различные свойства.



Структурные схемы, процессы на входе  $\varepsilon$  и выходе  $u$  регуляторов:

- а) пропорционального регулятора (П-регулятора); б) интегрирующего регулятора (И-регулятора);  
в) пропорционально-интегрирующего регулятора (ПИ-регулятора); г) ПИД-регулятора

В настоящее время существует концепция, в соответствии с которой задачи управления большинством технологических и других процессов в состоянии решить набор из ПИД-регуляторов и ограниченного по номенклатуре числа функциональных приборов (сумматоров, таймеров, переключателей и других блоков). Значит, надо создать программы, моделирующие алгоритмы работы соответствующих приборов. Далее задача состоит в том, чтобы поместить эти программы в память микропроцессорного управляющего устройства и сделать так, чтобы пользователь смог извлекать и агрегатировать их желаемым образом без программирования. Точнее, при этом используется так называемое технологическое программирование. Это направление, естественно, в максимальной степени автоматизированное, в настоящее время широко развивается рядом ведущих фирм.

ПИД-регуляторы и другие регуляторы подобного типа при их интегральном исполнении не могут решать задачи адаптивного управления. Кроме того, при их использовании затруднительно варьировать критерий качества управления, а также учитывать в полной мере участвующие в управляемом процессе свойства объекта управления, приводов, датчиков, априори выбранных обратных связей и ограничений, а также желаемые свойства движения объекта управления. Известные попытки исключить эти недостатки приводят к потере универсальности алгоритмов и не решают всех связанных с этим проблем. Безусловно, широко используемые в настоящее время классические регуляторы нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

Алгоритм ПИД-регулятора в непрерывной форме имеет вид

$$u(t) = K_p \left( \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

где  $K_p$  – коэффициент усиления регулятора;  $T_i, T_d$  – постоянные времени интегратора и дифференциатора соответственно;  $\varepsilon(t)$  – ошибка (рассогласование).

Алгоритм (1) может быть записан в параллельной форме:

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ ;  $K_d = K_p T_d$ .

В дискретном варианте алгоритм (2) имеет вид

$$u[k+1] = u[k] + (K_p + K_i + K_d)\varepsilon[k+1] - (K_p + 2K_d)\varepsilon[k] + K_d\varepsilon[k-1], \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

## 2. Регуляторы нового поколения

В работах [3–5] предлагается новый подход к решению проблемы, новые математические, алгоритмические и программные средства, создан универсальный регулятор нового поколения [1, 2], выходной сигнал которого определяется выражением

$$u(\bar{x}, x, \dot{x}, \ddot{x}, x^{(4)}, f, \dot{f}, \ddot{f}, z, \dot{z}, \ddot{z}) = \Phi_0 \left\{ k_0 z + \left[ \Phi_1(f, \dot{f}, \ddot{f}) + \Phi_2(x, \dot{x}, \ddot{x}, x^{(4)}) + \Phi_3(z, \dot{z}, \ddot{z}) \right] \right\}. \quad (4)$$

В частном случае из (4) вытекает алгоритм

$$u(\bar{x}, x, \dot{x}, \ddot{x}, f, z, \dot{z}) = \Phi_0 \left\{ k_0 z + \left[ \Phi_1(f) + \Phi_2(x, \dot{x}, \ddot{x}) + \Phi_3(z, \dot{z}) \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $\Phi_j(\cdot)$  – известные операторы,  $j = 0, \dots, 3$ ;  $z$  – выходная переменная силового исполнительного механизма;  $k_0$  – константа, характеризующая эффективность отрицательной обратной связи по выходной переменной исполнительного механизма.

Вариацией функционалов  $\Phi_j$  может быть получен спектр адаптивных регуляторов нового поколения. Как видно из выражения (4), с точки зрения вычислений предпочтительным является наблюдение ускорений управляемой переменной либо скорости изменения ускорений. ненаблюдаемые, но необходимые для целей управления переменные могут быть получены путем интегрирования либо дифференцирования наблюдаемой переменной.

В соответствии с функционалом  $\Phi_1$  в каждый момент времени формируются желаемые свойства движения объекта. Функционал  $\Phi_2$  отражает фактическое состояние объекта в каждый момент времени. Роль функционала  $\Phi_3$  состоит в компенсации недостатков исполнительного механизма. Первый член в выражении (4) компенсирует ослабление сигнала управления, если априори выбирается обратная связь для ограничения выходной переменной исполнительного механизма.

Интегрированная система управления свойствами движения мобильных машин на основе регулятора (4) описана в патенте [3], а программное обеспечение моделирования и компьютерного проектирования встроенной системы – в работе [4]. Некоторые приложения – в работах [5–14].

Таким образом, для решения адаптивного управления разработаны новые концепция, технология синтеза алгоритмов, получены на их основе высокоэффективные алгоритмы адаптивного управления, которые реализованы в виде регуляторов. Новые регуляторы адаптивного управле-

ния сближают возможности hardware и software, сочетают высокую точность и быстродействие без перерегулирования, обеспечивают возможность задания любых желаемых свойств движения системы при гарантированной устойчивости и адаптивности управления. Кроме того, новые регуляторы обеспечивают порождение и поддержание в управляемых системах любых желаемых свойств движения управляемой системы, обеспечивая высокую точность, быстродействие, помехозащищенность, слабую чувствительность к изменению параметров системы и возмущений.

Регуляторы нового поколения благодаря использованию предельных (потенциальных) возможностей управляемых систем на качественно новом уровне решают известные и новые классы задач управления, сводящихся к осуществлению любых предписанных свойств движения системы либо к минимизации квадратичных критериев качества. Новый регулятор может быть реализован программно при использовании персональных компьютеров в контуре управления либо любом известном контроллере при использовании среды CoDeSys.

При использовании специально созданной системы моделирования [4] автоматизируется тестирование алгоритмов управления в различных условиях применения, существенно сокращаются время и стоимость проекта, повышается качество виртуального проектирования систем управления.

Новые концепция и алгоритмы адаптивного управления, реализованные в виде регулятора нового поколения, встраиваются в контроллер. В результате software последнего соответствует возможностям hardware современных вычислительных систем. В режиме дружественного интерфейса производится настройка контроллера на требуемый класс задач и базу данных. При этом в диалоговом режиме в базу данных контроллера передается следующая информация:

- класс задач (например, стабилизация, активная виброзащита, слежение и др.);
- желаемые свойства движения управляемых систем (критерий качества управления);
- тип используемого привода (электрический с двигателем постоянного или переменного тока, электрогидравлический и др.);
- параметры, характеризующие свойства объекта управления, приводов, сенсоров, априори выбранных обратных связей;
- параметры функций предпочтения нечетко заданных параметров желаемых свойств движения и других параметров системы.

Инсталлируемые в контроллер регуляторы обеспечивают прецизионное и быстродействующее адаптивное управление согласно заданному критерию качества функционирования для систем линейных и нелинейных при линейных и нелинейных критериях, при четком и нечетком задании критериев и информационной базы системы. Регулятор обеспечивает оптимальность переходных процессов при осуществлении назначенных траекторий движения, предоставляет возможность порождать и поддерживать в управляемых системах любые желаемые свойства движения, в том числе присущие только нелинейным системам. Это качество существенно отличает предлагаемый способ управления от известных.

Общие затраты на разработку контроллеров могут быть существенно снижены при использовании систем кросс-генерации, которые позволяют получить из исходных программ, написанных на языках высокого уровня, программы в кодах конкретных микропроцессорных систем. Задача полностью автоматизируется и упрощается при работе в среде CoDeSys.

## **Заключение**

Унифицированные контроллеры, которые используют интеллектуальные регуляторы нового поколения, ориентированные на решение широкого класса задач управления, упростят и удешевят создание встроенных управляемых систем высокого качества. Нетрадиционный подход позволяет с новых позиций подойти к построению высокоэффективных адаптивных систем управления. Новые регуляторы адаптивного управления, в отличие от ПИД-регуляторов, сочетают высокую точность и быстродействие без перерегулирования, обеспечивают возможность задания любых желаемых свойств движения системы при гарантированной устойчивости и адаптивности управления. Кроме того, новые регуляторы обеспечивают порождение и поддержание в управляемых системах любых желаемых свойств движения управляемой системы,

обеспечивая высокую точность, быстродействие, помехозащищенность, слабую чувствительность к изменению параметров системы и возмущений.

### Список литературы

1. Регулятор Фурунжиева : пат. 3160 Респ. Беларусь, МПК6, G 05B 11/00 / Р.И. Фурунжиев ; заявитель Р.И. Фурунжиев. – № а 960195 ; заявл. 1996.04.19 ; опубл. 30.12.1999 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1999. – № 4. – С. 175.
2. Способ и регулятор для управления системами : пат. № 2153697 РФ, МПК7 G 05B 17/00 / Р.И. Фурунжиев ; заявитель Р.И. Фурунжиев. – № а 97107392/09 ; заявл. 24.04.1997 ; опубл. 27.07.2000 // Изобретения. Полезные модели / Рос. Агентство по патентам и товарным знакам. – 2000. – № 21. – С. 547.
3. Способ Фурунжиева управления движением транспортного средства : пат. 5182 Респ. Беларусь, МПК7, В 60К 41/00 / Р.И. Фурунжиев ; заявитель Р.И. Фурунжиев. – № а 19990225 ; заявл. 1999.03.10 ; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 2. – С. 129.
4. Программное обеспечение моделирования и оптимизации динамических систем ADMOS : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2000610671 от 21 июля 2000 г. / Р.И. Фурунжиев, Н.Н. Гурский. – РосПАТЕНТ, 2000.
5. Фурунжиев, Р.И. Регуляторы нового поколения для снижения колебаний мобильных машин / Р.И. Фурунжиев, А.Л. Хомич // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 29.12.2007 г. – № 4 (17). – С. 133–139.
6. Фурунжиев, Р.И. Повышение мобильности транспортных средств на основе новых алгоритмов адаптивного управления / Р.И. Фурунжиев, А.Л. Хомич // Сб. науч. статей Военной академии Республики Беларусь. – 2007. – № 13. – С. 106–112.
7. Фурунжиев, Р.И. Концепция, методы, алгоритмы и программы управления свойствами движения мобильных машин и их подсистем / Р.И. Фурунжиев, А.Л. Хомич // Механика машин на пороге III тысячелетия : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск. – Минск : НИРУП «Белавтотракторостроение», 2000. – С. 282–291.
8. Fourounjiev, R. Synthesis of Vibration Protection Systems Ensuring the Desirable Motion Properties / R. Fourounjiev, A. Homich // International Conf. «Vibroengineering-98». – Kaunas, Lithuania, 1998.
9. Fourounjiev, R. Synthesis of Adaptive Control Algorithms of Vibrotechnical Systems / R. Fourounjiev, A. Homich // Journal of Vibroengineering. – Vilnius, Lithuania, 2000. – № 4 (5). – P. 37–42.
11. Fourounjiev, R. Synthesis of Adaptive Control Algorithms on Their Given Movements Properties / R. Fourounjiev, A. Homich // Journal of Vibroengineering. – Vilnius, Lithuania, 2000. – № 4 (5). – P. 43–50.
12. Fourounjiev, R. A New Intellectual Control for Mechatronic Systems / R. Fourounjiev, A. Homich // The 6th International Conference Vibroengineering-2006 Proceedings, October 12–14, 2006. – Kaunas, Lithuania : Technologia, 2006. – P. 19–26.
13. Fourounjiev, R. Concept and Methods an Adaptive Vibration Protection and Stabilization / R. Fourounjiev, A. Homich // Trans. of 3rd International Conference «Mechatronic Systems and Materials (MSM 2007)», September 27–29, 2007. – Kaunas, Lithuania, 2007. – P. 220–228.
14. Хомич, А.Л. Системы активной виброзащиты и стабилизации / А.Л. Хомич, Р.И. Фурунжиев. – Минск : А.Н. Вараксин, 2007. – 452 с.

Поступила 25.04.08

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Независимости, 65  
e-mail: yulij@tut.by

**N.N. Hurski, Y.I. Slabko, R.I. Fourounjiev, A.L. Homich**

**THE CURRENT STATE AND PERSPECTIVES OF THE DEVELOPMENT  
OF REGULATORS FOR CONTROL SYSTEMS**

The current state and perspectives of further development of adaptive regulators used for control systems are discussed. A new approach and technology of control synthesis for a class of adaptive control systems by given criteria, when generally both the dynamic system and criterion are nonlinear are considered. The specific properties of target movement variable are considered as a criterion.