

УДК 681.5.015.3: 681.5.017: 629.7.015.4

# СИНТЕЗ РЕЗОНАНСНОГО ПИ-РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРОПРИВОДА

**М.В. Трубин**

*Новосибирский Государственный Технический Университет*  
Россия, 630073, Новосибирск, К. Маркса просп., 20  
E-mail: morkai@bk.ru

**В.Т. Буй**

*Новосибирский Государственный Технический Университет*  
Россия, 630073, Новосибирск, К. Маркса просп., 20  
E-mail: tamtlpt@gmail.com

**В.Д. Юркевич**

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН*  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
*Новосибирский Государственный Технический Университет*  
Россия, 630073, Новосибирск, К. Маркса просп., 20  
E-mail: yurkev@mail.ru

**Ключевые слова:** электрогидравлический привод, система автоматического управления, метод разделения движений, резонансный регулятор, пропорционально-интегральный регулятор.

**Аннотация:** Рассматривается задача управления перемещением поршня электрогидропривода, где электрогидропривод может быть использован как исполнительный механизм в составе таких технических систем как стабилизируемая платформа, стенд для прочностных испытаний механических конструкций, система активной виброизоляции. Обсуждаемая задача управления состоит в обеспечении требования асимптотического стремления к нулю ошибки формирования заданного гармонического закона перемещения поршня электрогидропривода. Новизна предлагаемого подхода к синтезу системы управления электрогидроприводом заключается в введении резонансной составляющей в структуру пропорционально-интегрального регулятора и применении метода разделения движений для расчета параметров регулятора и анализа свойств замкнутой системы управления. Приведены результаты применения предлагаемого алгоритма управления на экспериментальном стенде.

## 1. Введение

Существует множество мехатронных систем, назначение которых состоит в формировании заданного режима гармонических колебаний или в обеспечении

эффективного подавления гармонических возмущающих воздействий в системе управления. Например, одной из актуальных технических задач является разработка активных средств защиты оборудования и человека оператора от влияния вибрации [1]. Другим примером является задача управления вибрационными установками с целью формирования заданной гармонической траектории движения исполнительного механизма [2]. Необходимость активного подавления колебательных процессов может возникать при некоторых режимах полета летательного аппарата [3]. Повышение точности формирования заданного автоколебательного режима или достижение высокой степени подавления гармонических возмущающих воздействий может быть достигнута путем использования алгоритмов управления с большими коэффициентами в обратной связи [4]. Однако при практической реализации, при наличии неучтенной динамики и запаздываний в контуре регулирования, увеличение коэффициентов усиления обычно приводит к ухудшению показателей качества переходных процессов и потере устойчивости системы. Применение принципа внутренней модели [5] позволяет повысить точность регулирования в условиях известной частоты гармонических возмущающих воздействий путем введения дополнительной резонансной составляющей в структуру алгоритма управления [6–9].

В данной работе предлагается методика расчета резонансного пропорционально-интегрального регулятора для электрогидропривода на основе применения метода разделения движений и принципа внутренней модели с целью формирования заданного режима гармонических колебаний штока гидроцилиндра. Предлагаемый подход к синтезу резонансного регулятора, в отличие от [6–8], позволяет формировать резонансную составляющую регулятора независимо от выбора параметров пропорционально-интегральной составляющей регулятора. Приведены результаты испытаний предлагаемой методики на экспериментальном стенде.

## 2. Постановка задачи управления

В данной работе рассматривается задача формирования заданной траектории перемещения штока гидроцилиндра, математическая модель которого представлена в виде интегрирующего звена [9]:

$$(1) \quad \dot{y}(t) = bu(t),$$

где  $y$  – величина перемещения поршня гидроцилиндра,  $u$  – управляющее воздействие на входе блока управления электрогидропривода;  $b$  – коэффициент усиления электрогидропривода,  $b > 0$ .

Желаемая траектория движения штока гидроцилиндра задана следующим выражением  $r(t) = A_r \sin(\omega_1 t)$ . Требуется обеспечить свойство асимптотического стремления ошибки регулирования к нулю:

$$(2) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \sup_{t \geq 0} |e(t)| = 0,$$

где  $e(t) = r(t) - y(t)$ . Если использовать пропорционально-интегральный регулятор следующего вида:

$$(3) \quad u(s) = \frac{k_0(s + T^{-1})}{\mu s} e(s),$$

тогда ошибка реализации гармонического задающего воздействия может быть найдена по амплитудно-частотной характеристике передаточной функции:

$$(4) \quad S(s) = \frac{e(s)}{r(s)} = \frac{\mu s^2}{\mu s^2 + bk_0(s + T^{-1})},$$

где  $r(s), e(s)$  это изображения по Лапласу для сигналов  $r(t), e(t)$ .

Соответствующие пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора (3) имеют вид  $k_p = k_0/\mu$ ,  $k_i = k_0/(\mu T)$ .

Отметим, что для передаточной функции (4) имеет место свойство

$$|S(j\omega_1)| \neq 0 \text{ при } \omega_1 \neq 0.$$

Таким образом, в системе (1),(3) не обеспечивается асимптотическое стремление к нулю (2) ошибки формирования заданной траектории движения штока гидроцилиндра. Уменьшить величину ошибки регулирования возможно путем уменьшения величины параметра  $\mu$ , однако это приводит к увеличению коэффициентов  $k_p, k_i$ , что может привести к потере устойчивости при наличии неучтенной динамики и запаздывания в контуре регулирования.

### 3. Синтез резонансного ПИ-регулятора

С целью обеспечения свойства асимптотического стремления к нулю (2) ошибки регулирования предлагается использовать модифицированную структуру ПИ-регулятора с дополнительным резонансным блоком:

$$(5) \quad u(s) = \left[ \frac{s^2 + k_r s + \omega_1^2}{s^2 + \omega_1^2} \right] \frac{k_0(s + T^{-1})}{\mu s} e(s).$$

В данном случае ошибка реализации гармонического задающего воздействия определяется передаточной функцией вида:

$$(6) \quad S(s) = \frac{\mu s^2(s^2 + \omega_1^2)}{\mu s^2(s^2 + \omega_1^2) + bk_0(s + T^{-1})(s^2 + k_r s + \omega_1^2)},$$

для которой выполняется условие  $|S(j\omega_1)| = 0$  при  $\omega_1 \neq 0$ , что позволяет обеспечить выполнение требования (2) для  $r(t) = A_r \sin(\omega_1 t)$ .

Расчет коэффициентов регулятора с резонансным блоком (5) выполняется методом разделения движений путем выделения уравнений подсистем быстрых и медленных движений. При этом уравнение характеристического полинома подсистемы быстрых движений имеет вид:

$$(7) \quad A_{\text{ПВД}}(s) = \mu s + bk_0,$$

а уравнение характеристического полинома подсистемы медленных движений:

$$(8) \quad A_{\text{ПМД}}(s) = bk_0(s + T^{-1})(s^2 + k_r s + \omega_1^2).$$

Из полиномов (7) и (8) следует, что устойчивость быстрых и медленных процессов, а также требование на разделение темпов этих процессов, можно обеспечить путем

соответствующего выбора параметров  $k_0$ ,  $T$  и  $\mu$  пропорционально-интегральной компоненты регулятора (5). Рекомендуется выбрать  $k_0 = 1/b, T$  в соответствии с требованием на желаемое время переходного процесса ошибки регулирования  $e(t)$ ,  $\mu$  выбирается исходя из требования:

$$\mu \leq \min\{T/\eta, 1/(\omega_1\eta)\},$$

где  $\eta$  степень разделения темпов быстрых и медленных процессов, например  $\eta \geq 10$ . Параметр  $k_r$  можно принять равным следующей величине:  $k_r = 2\omega_1$ .

## 4. Результаты моделирования и экспериментов

На рисунках 1 – 4 приведены результаты численного моделирования и экспериментов на стенде при следующих параметрах системы:  $b = 0.42$ ,  $A_r = 27$ ,  $\omega_1 = 0.314$ ,  $k_p = 2.357$ ,  $k_i = 2.357$ .

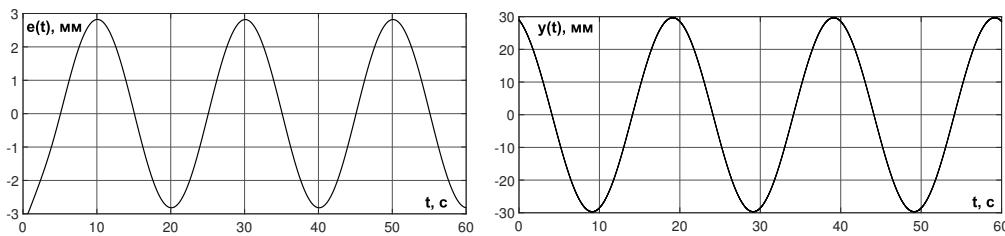


Рис. 1. Ошибка регулирования и данные с датчика перемещения при алгоритме управления без резонансного блока (3), полученные на модели (1)

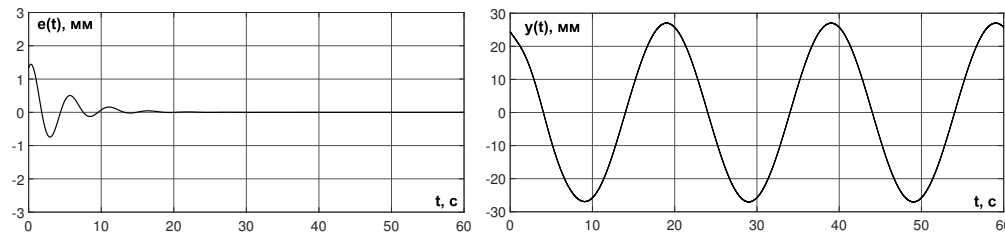


Рис. 2. Ошибка регулирования и данные с датчика перемещения при алгоритме управления с резонансным блоком (5), полученные на модели (1)

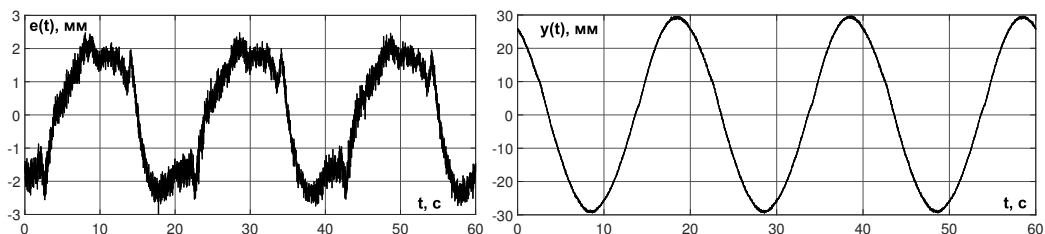


Рис. 3. Ошибка регулирования и данные с датчика перемещения при алгоритме управления без резонансного блока (3), полученные на экспериментальном стенде

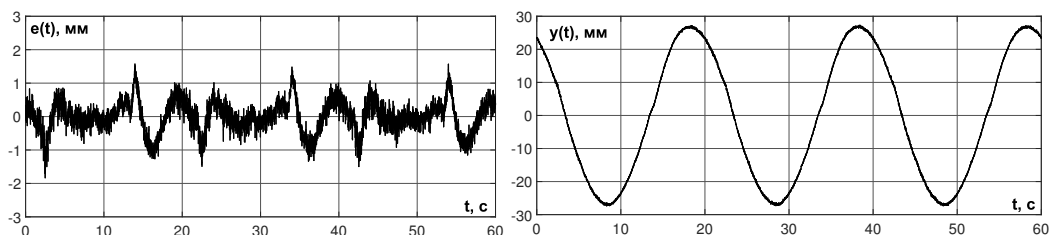


Рис. 4. Ошибка регулирования и данные с датчика перемещения при алгоритме управления с резонансным блоком (5), полученные на экспериментальном стенде

## 5. Заключение

Результаты численного моделирования показывают, что предлагаемый алгоритм управления обеспечивает требование асимптотического стремления к нулю ошибки формирования заданного гармонического перемещения штока гидроцилиндра без необходимости увеличения коэффициентов усиления пропорционально-интегрального регулятора. Результаты экспериментов на стенде также показывают, что введение резонансного блока устраняет составляющую ошибки регулирования, которая соответствует частоте задающего воздействия, в то время как для уменьшения других составляющих ошибки, возникающих в силу нелинейности характеристик стенда, необходимо вводить дополнительные резонансные блоки и увеличивать коэффициенты пропорционально-интегрального регулятора.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема государственной регистрации № ГЗ 124041700067-6).

## Список литературы

1. Круглов Ю.А., Туманов Ю.А. Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. 221 с.
2. Управление мехатронными вибрационными установками / Под ред. И.И. Блехмана и А.Л. Фрадкова. СПб.: Наука, 2001. 278 с.
3. Андриевский Б.Р., Кузнецов Н.В., Леонов Г.А. Методы подавления нелинейных колебаний в астатических системах автопилотирования летательных аппаратов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления, 2017. № 3. С. 118–134.
4. Мееров М.В. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 284 с.
5. Francis B., Wonham W. The internal model principle of control theory // Automatica, 1976. Vol. 12, No. 5. P. 457–465.
6. Бобцов А.А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // Автоматика и телемеханика. 2008. № 8. С. 25–32.
7. Бобцов А. А., Пыркин А.А. Компенсация неизвестного синусоидального возмущения для линейного объекта любой относительной степени // Автоматика и телемеханика. 2009. № 3. С. 114–122.
8. Гайдук А.Р. Синтез селективно инвариантных систем управления // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 1. С. 46–55.
9. Буй В.Т., Юркевич В.Д. Резонансный ПИ-регулятор для судовой электрогидравлической стабилизированной платформы // Доклады ТУСУР. 2023. Т. 26, № 2. С. 81–87.