

А. А. Чертков,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Д. С. Тормашев,
канд. техн. наук, старший преподаватель,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет
морского флота имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»;

С. В. Сабуров,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СРЕДСТВАМИ MATLAB

DYNAMIC SYSTEMS PARAMETRIC ARRANGE BY MEANS PID TUNER IN MATLAB

Статья посвящена параметрической настройке ПИД-регуляторов динамических систем средствами MatLab. Приведен алгоритм настройки регуляторов во временной и частотной областях на базе функции pidtool и рабочего инструмента PID Tuner. Показано, что элементы объектно-ориентированного программирования и операции экспорта (импорта) данных позволяют значительно повысить эффективность синтеза систем. Рассмотрен пример настройки ПИД-регулятора для динамического объекта с транспортным запаздыванием.

The article is devoted to dynamic systems parametric arrange used PID tuner in MatLab. Tuning algorithm for controller in time and frequency spaces with function pidtool and PID Tuner facility is represented. It is shown that plant oriented programming and export (import) operations are powerful for system synthesis. PID tuner example for object with time delay is devoted.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, параметрическая настройка, динамический объект, алгоритм, транспортное запаздывание, аппроксимация Паде, синтез систем управления.

Key words: PID regulator, parametric tune, dynamic object, algorithm, transport delay, Pade approximation, system control synthesis.



ЭФФЕКТИВНОСТЬ и качество функционирования систем управления технологическими процессами на водном транспорте во многом определяется корректностью выбора параметров регуляторов. К наиболее распространенным типам регуляторов относятся ПИД-регуляторы, содержащие в своей структуре пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие сигналов, которые задаются путем выбора постоянных коэффициентов, соответствующих этим составляющим. Функциональное исполнение ПИД-регуляторов таково, что блоки, генерирующие сигналы, соединены параллельно. Это позволяет оценивать влияние каждой составляющей на динамику системы как отдельно, так и в совокупности, что упрощает процесс настройки регуляторов в производственных условиях. Широкое распространение ПИД-регуляторов в промышленных установках и на транспорте определяется наряду с возможностью упрощенной параметрической настройки пригодностью для решения многих практических задач при низкой стоимости аппаратных средств, а также применением наглядных, глубоко изученных принципов коррекции поведения динамических систем, базирующихся на классической теории систем автоматического регулирования. Вместе с тем, несмотря на достигнутые результаты в области теории конструирования ПИД-регуляторов и накопленный опыт их практического применения, в выборе параметров настройки зачастую продолжают ис-

пользоваться эмпирические методы, без должного теоретического обоснования и применения современных компьютерных технологий.

К наиболее популярным методам настройки ПИД-регуляторов, основанным на специфических алгоритмах, относятся: метод Зиглера–Никольса (Ziegler–Nichols), Кохена–Куна (Cohen–Coon), метод внутреннего модельного управления (со встроенной моделью процесса), Саида–Мади (Saeed and Mahdi) и др. [2, р. 1307–1311]. В большинстве отечественных и зарубежных публикаций, посвященных проблеме настройки систем с ПИД-регуляторами, можно найти практически обоснованные рекомендации, доведенные до инструкций и технологических правил, принятых в различных фирмах, корпорациях и объединениях по выпуску аппаратных средств управления технологическими процессами в промышленности и на транспорте. Так, например, для настройки ПИД-регуляторов частоты вращения электроприводов Данфосс.wnv (Danfoss Power Electronic, <http://www.youtube.com>) в блочном исполнении создан видеоролик с демонстрационным временем, равным 10 мин. Известны технологические решения с автоматической настройкой параметров по адаптивным алгоритмам с использованием методов нечеткой логики, генетических алгоритмов и др.

Вместе с тем, проблема параметрической настройки ПИД-регуляторов продолжает привлекать к себе большое внимание. Причина состоит в возникающих трудностях при управлении нелинейными системами, объектами с транспортным запаздыванием, в случаях появления шумов при измерениях переменных состояния и выхода, а также при неполной информации о динамике технологических процессов в нестационарных условиях эксплуатации. Во многих ситуациях настройка параметров регуляторов выполняется путем визуальной оценки переходных процессов, без комплексных количественных оценок с применением компьютерных технологий и спектрального анализа.

Эффективность и качество оценки параметров настройки регуляторов можно повысить за счет современных средств моделирования и применения специальных инструментариев различных вычислительных сред, ориентированных на решение задач в данной предметной области [1, с. 56–66]. В интегрированной среде MatLab таковым инструментом является ПИД-тюнер, реализованный с помощью функции `pidtool`. На рис. 1 представлена структурная схема системы управления, состоящая из объекта и ПИД-регулятора.

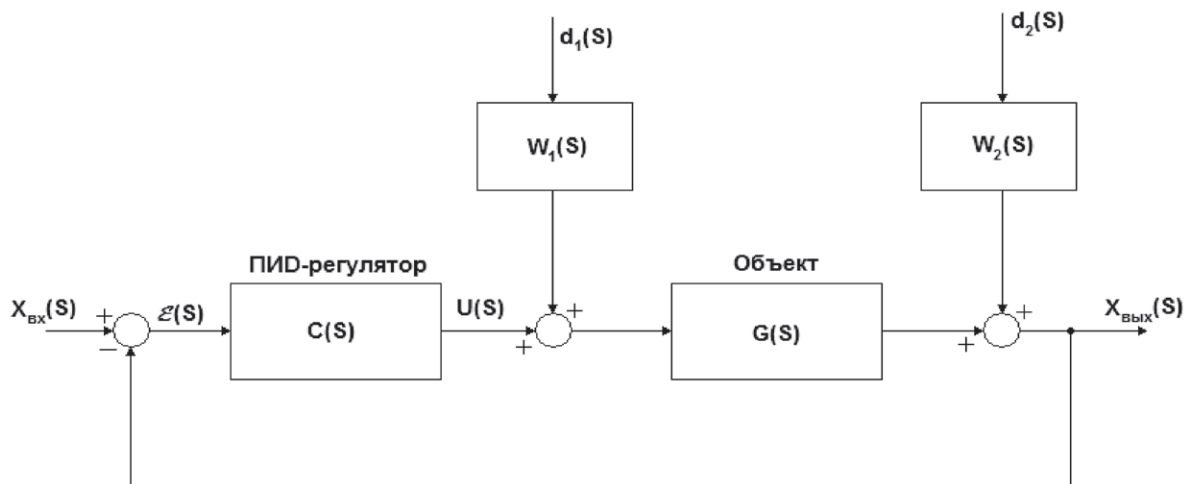


Рис. 1. Структурная схема системы управления с ПИД-регулятором

Показаны сигналы в операторной форме, воздействующие на объект и регулятор. Применение передаточных функций позволяет использовать ПИД-тюнер для работы с неминимально-фазовыми системами и системами с транспортным запаздыванием.

Для анализа качества параметрической настройки системы управления (рис. 1) возможно получение динамических характеристик как замкнутой системы в целом, так и ее блоков во временной и частотной областях. С этой целью введем передаточные функции:

$W(s) = \frac{x_{\text{вых}}}{\varepsilon(s)} = C(s) \cdot G(s)$ — передаточная функция разомкнутой системы:

$F_c(s) = \frac{x_{\text{вых}}(s)}{x_{\text{вх}}(s)} = \frac{W(s)}{1 + W(s)}$ — передаточная функция замкнутой системы с единичной отрицательной обратной связью.

$$F_1(s) = \frac{u(s)}{x_{\text{вх}}(s)} = \frac{C(s)}{1 + W(s)},$$

$$F_2(s) = \frac{x_{\text{вых}}(s)}{d_1(s)} = \frac{W_1(s) \cdot \text{sys}(s)}{1 + W(s)},$$

$$F_3(s) = \frac{x_{\text{вых}}(s)}{d_2(s)} = \frac{W_2(s)}{1 + W(s)},$$

где $F_1(s)$, $F_2(s)$ и $F_3(s)$ — передаточные функции, устанавливающие связь между соответствующими входами и выходами (см. рис. 1).

Математическая модель системы (объекта) согласно синтаксису `pidtool` может представляться в форме передаточной функции (*tf*), модели с заданными нулями и полюсами (*zpk*), модели в пространстве состояний (*ss*) и др. Модель, созданная в графическом интерфейсе пользователя (GUI), может применяться как объект, предназначенный для автоматизации и выполнения структурных преобразований динамических систем. Такая модель значительно упрощает выполнение громоздких расчетов, требуемых для анализа и синтеза регуляторов технологических процессов во временной и частотной областях.

ПИД-регулятор с передаточной функцией $C(s)$ в инструментарии Control Toolbox среды MatLfi используется для настройки систем путем введения сигналов K_p , K_i и K_d с пропорциональным, интегральным и дифференциальным коэффициентами усиления с помощью функции `pid`. Синтаксис функции:

$$C = \text{pid}(K_p, K_i, K_d, T_f).$$

T_f — постоянная времени фильтра первого порядка в дифференциальной составляющей сигнала. Передаточная функция модели ПИД-регулятора может иметь параллельную, либо стандартную структуру. В первом случае

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d \cdot s}{T_f \cdot s + 1};$$

во втором —

$$C(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i \cdot s} + \frac{K_p \cdot T_d \cdot s}{T_f \cdot s + 1}.$$

Настройка параметров ПИД-регулятора в окне PID Tuner производится с помощью двух «потенциометров», движки которых «захватываются» мышью и плавно перемещаются влево или вправо. Верхним «потенциометром» задается время переходного процесса (Response time), а нижним (Transient behavior) — поддерживается баланс между временем переходного процесса и запасом устойчивости, то есть обеспечивается робастность системы с ПИД-регулятором.

Для оценки качества настройки следует открыть окно (Show parameters) и контролировать значения параметров ПИД-регулятора (Controller parameters), а также показатели качества переходного процесса (Performance and robustness). Переходный процесс в системе для каждого положения движков представляется графической зависимостью изменения выходного сигнала в функции времени. Таким образом, параметры регулятора в рабочем инструменте `pidtool` не задаются, а вычисляются автоматически для соответствующих численных значений времени переходного процесса и робастности.

Можно убедиться в том, что с увеличением K_p уменьшается ошибка в установившемся режиме, однако уменьшается также и запас устойчивости по амплитуде и фазе, вследствие чего

в системе могут возникнуть колебания. Введение коэффициента K_i соответствует применению в структуре системы интегрирующего звена, что способствует уменьшению до нуля статической ошибки в установившемся режиме за счёт увеличения коэффициента передачи на низких частотах, при снижении запасов устойчивости по фазе. С увеличением коэффициента K_d возрастает величина дифференцирующего сигнала, что приводит к уменьшению времени переходного процесса и повышению устойчивости. Однако следует помнить, что увеличение коэффициента передачи на высоких частотах может способствовать ухудшению качества управления при воздействии на систему высокочастотных помех и т. п. Поэтому часто при формировании дифференцирующего сигнала с помощью ПИД-регулятора применяется фильтр первого порядка.

В среде MatLab также предусмотрена автоматическая настройка параметров ПИД-регулятора с введением процедуры выбора коэффициентов по эталонной модели, что также способствует упрощению решения задач параметрической оптимизации систем.

Расчет динамической системы с ПИД-регулятором средствами инструмента pidtool выполним на примере простого объекта с транспортным запаздыванием по входу. Передаточная функция объекта:

$$G(s) = e^{-s\tau} \cdot \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (1)$$

где K — постоянный коэффициент, T — постоянная времени, τ — транспортное запаздывание, s — оператор Лапласа. Применительно к смесителю различных сортов топлива выберем следующие параметры передаточной функции объекта [1]:

$$G(s) = e^{-1,075 \cdot s} \cdot \frac{1,54}{5,93 \cdot s + 1}. \quad (2)$$

Для перехода к передаточной функции, не содержащей в явном виде время запаздывания τ , воспользуемся аппроксимацией Паде первого порядка. В результате получим

$$G_p(s) = \frac{-1,54 \cdot s + 2,865}{5,93 \cdot s^2 + 12,03 \cdot s + 1,86}. \quad (3)$$

Предпочтение аппроксимации Паде отдано также потому, что нули числителя аппроксимирующего выражения обеспечивают повышенную точность аппроксимации разрывных функций.

На рис. 2 представлены переходные процессы объекта (системы без регулятора) и ее модели. Видно, что время переходного процесса объекта составляет более 30 с. Задача состоит в синтезе системы со структурой (рис. 1) и ПИД-регулятором с передаточной функцией $C(s)$, время переходного процесса в которой должно составлять 3,22 с при показателе робастности, равном 0,6.

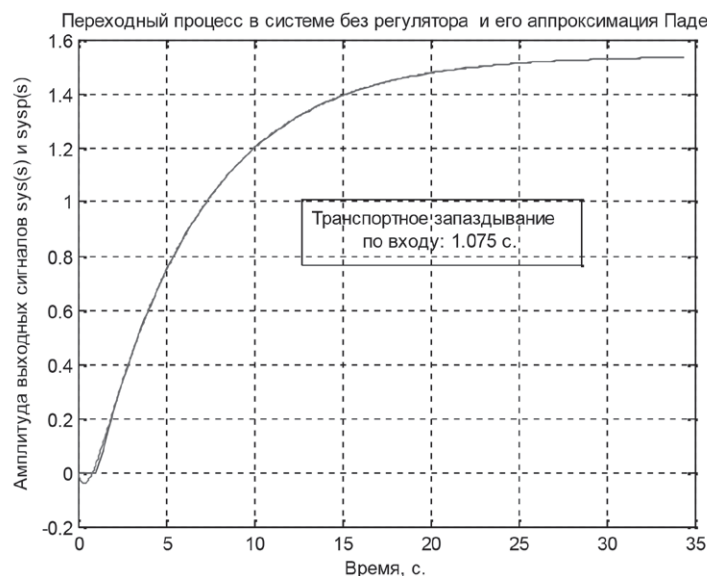


Рис. 2. Переходный процесс объекта с запаздыванием и его модель

Алгоритм настройки в режиме прямых вычислений.

1. Войти в MatLab и в командном окне создать объект с передаточной функцией (1).
2. С помощью функции аппроксимации Паде получить модель (2).
3. Ввести в функцию pidtool объект регулирования и выбрать структуру регулятора с соблюдением синтаксиса:

`pidtool(Gp,'pid').`

4. Войти в основное окно инструмента PID Tuner.
5. Выбрать режим настройки системы во временной области.

Установить в верхней линейке:

Design mode: Time domain.

Form: Parallel.

Type: PID.

В других окнах:

Plot: Step.

Response: Reference tracking.

6. Следуя по стрелке «Show parameters», открыть окна для оценки численных значений параметров настройки регулятора и переходного процесса в системе с обратной связью (рис. 1).

1. Настройка параметров.

Путем плавного перемещения движков виртуальных потенциометров Response time Transient behavior выполнить настройку регулятора, обеспечивающего требуемые показатели переходного процесса (п. 6 алгоритма), с оценкой по графику.

Установить в окнах потенциометров соответственно значения 3,22 seconds и 0,6. Убедиться, что этому режиму соответствуют следующие значения рабочих параметров системы:

Время нахождения реакции в активной области (RiseTime): 1,82 с.

Время переходного процесса (Setting): 8 с.

Перерегулирование: 3,06 %

Максимальная амплитуда (Peak): 1,03.

Запас устойчивости по амплитуде: 12 дБ @ 2,61 рад/с.

Запас устойчивости по фазе: 60 град @ 0,621рад/с.

Параметры ПИД-регулятора:

$K_p = 2,454$; $K_i = 0,33984$; $K_d = 0,30815$; $T_f = 0,0000$.

Если требуется увеличить число контролируемых параметров, то необходимо использовать функции stepinfo, либо isiminfo. Кроме того, для получения параметров сигналов в любой точке переходной характеристики можно воздействовать на эту точку левой кнопкой мыши. На рис. 3 изображена переходная характеристика спроектированной системы (рис. 1), которая имеет приведенные выше рабочие параметры. Показано, что точка, выделенная на кривой, имеет координаты (3,21, 0,999).

Настройка параметров ПИД-регулятора в частотной области выполняется аналогично.

С этой целью в окнах PID Tuner необходимо выбрать следующие режимы:

Design mode: Frequency domain.

Plot: Bode.

При этом изменятся наименования линеек виртуальных потенциометров.

Установить в окне верхнего потенциометра величину Bandwidth: 0,621 рад/с; в окне нижнего потенциометра Phase margin: 60°.

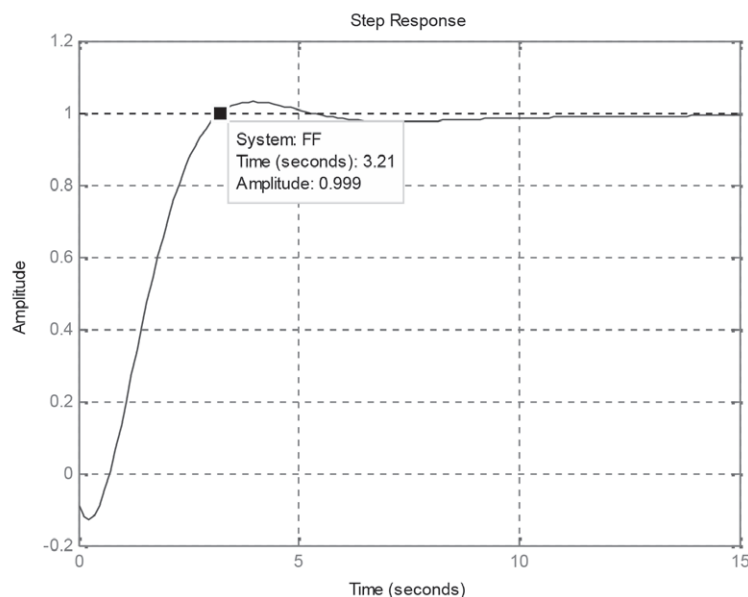


Рис. 3. Переходная характеристика системы с ПИД-регулятором

В результате получим численные значения, полностью совпадающие с выполненными ранее расчетами во временной области. На рис. 4 приведены логарифмическая амплитудная и фазовая характеристики (ЛАХ и ЛФХ) динамической системы (рис. 1). По ЛАХ и ЛФХ нетрудно определить постоянные времени на сопрягающих частотах, а также запасы устойчивости по фазе, отвечающие требованиям робастности.

Следует также отметить, что в основном окне инструмента PID Tuner можно исследовать динамику системы при различных входах и выходах, представленную передаточными функциями $F_1(s)$, $F_2(s)$, $F_3(s)$, а также передаточной функцией системы $W(s) = \frac{x_{\text{вых}}}{\varepsilon(s)} = C(s) \cdot \text{sys}(s)$ без обратной связи. Для анализа влияния параметров настройки регулятора и возмущений на входе и выходе объекта на поведение системы в динамике необходимо в окне Response выбрать режим, соответствующий одной из передаточных функций.

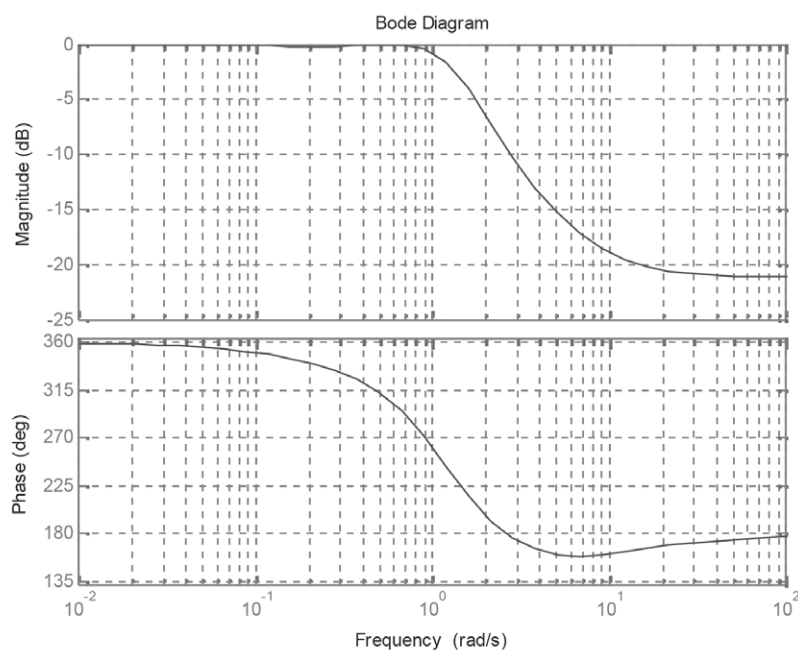


Рис. 4. Логарифмические амплитудная и фазовая характеристики системы с ПИД-регулятором (диаграмма Боде)

Инструмент PID Tuner имеет широкий спектр возможностей, связанных с параметрическим синтезом систем и средств автоматизации. Так, например, на его основе можно выполнять комплексные исследования по оценке поведения системы, находящейся одновременно под воздействием всех входных сигналов и возмущений, определенных передаточными функциями и содержащих как детерминированные, так и стохастические составляющие.

В левой части верхней линейки основного окна инструмента предусмотрены кнопки Import new plant model or baseline controller и Export plant or controller to workspace. Первая служит для ввода новых моделей и их регуляторов, а вторая — для вывода (экспорта) динамики модели и ПИД-регулятора в рабочую область компьютера с последующим доступом к компонентам системы.

Воспользуемся второй кнопкой. В выпадающем окне Export Linear System выберем блоки Export plant model и Export PID controller. С помощью кнопки **ОК** перенесем данные моделей в рабочую область. В результате получим:

Объект: $G =$

$$\frac{-1,54s + 2,865}{5,93s^2 + 12,03s + 1,86}$$

ПИД-регулятор: $C =$

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

with $K_p = 2,45$, $K_i = 0,34$, $K_d = 0,308$

Continuous-time PID controller in parallel form.

Согласно рис. 1 в режиме прямых вычислений получим передаточную функцию системы с обратной связью по входу:

```
>> Fc=feedback(C*G1)
```

```
Fc =
```

```
-0.4745 s^3 - 2.896 s^2 + 6.508 s + 0.9737
```

```
-----
```

```
5.455 s^3 + 9.136 s^2 + 8.368 s + 0.9737
```

```
Continuous-time transfer function.
```

```
>>
```

Определим переходный процесс и произведем его численные оценки с помощью функции stepinfo(Fc) :

```
>> step(Fc),grid
```

```
stepinfo(Fc)
```

```
ans =
```

```
    RiseTime: 1.8243
```

```
    SettlingTime: 8.0032
```

```
    Overshoot: 3.0555
```

```
    Peak: 1.0306
```

```
    PeakTime: 3.9468
```

```
>>
```

Видно, что решения идентичны данным моделирования, выполненного с использованием инструмента PID Tuner.

Отметим, что PID Tuner может аналогично использоваться для параметрической настройки дискретных регуляторов и систем. Простота выполнения технологических операций по приведенному алгоритму, полное исключение рутинных преобразований, визуальное сопровождение принимаемых решений с численной оценкой рабочих параметров, экспорт и импорт данных, ясность и реализуемость целей открывают широкие возможности для использования тюнера на

практике. Перспективным представляется его применение для решения класса оптимизационных задач энергосбережения, предиктивного управления и управления по модели следования и др. На качественно новом уровне возможны решения задач группового управления подвижными объектами. Наконец, на базе тюнера возможны построения дискретных динамических моделей экономических и логистических систем, проведение исследований в сферах управления производством и финансовыми операциями на базе методов динамических аналогий с применением фундаментальных положений современной теории идентификации и практической оптимизации.

Список литературы

1. Андрианов Е. Н. Модальный метод параметрического демпфирования динамической системы / Е. Н. Андрианов, В. В. Сахаров, А. Г. Таранин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — Вып. 4 (16).
2. Rajvanshi S. Performance evaluation of various controllers designed for an industrial first order plus delay process / S. Rajvanshi, P. Juneja // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. — 2013 (April). — Vol. 2. — Is. 4.
3. Бесекерский В. А. Теория автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — М.: Наука, 1975. — 768 с.
4. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е. П. Попов. — М.: Наука, 1989. — 304 с.
5. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. — 832 с.
6. Филипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. — 616 с.
7. Гудвин Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. — М.: Бином, 2004. — 911 с.
8. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Дж. Пьяни. — СПб., 2001. — 577 с.
9. Лазарев Ю. Ф. MatLab 5.x / Ю. Ф. Лазарев. — Киев: BHV, 2000.
10. Дьяконов В. Simulink4: спец. справ. / В. Дьяконов. — СПб.: Питер, 2002.
11. Медведев В. С. Control system toolbox. MatLab 5 для студентов / В. С. Медведев, В. Г. По темкин. — М.: ДИАЛОГ МИФИ, 1999. — 287 с.