

УДК 681.5

СИНТЕЗ ВСТРАИВАЕМОЙ ОДНОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С САМОНАСТРАИВАЮЩИМСЯ РЕГУЛЯТОРОМ И ОЦЕНКА ЕЁ РОБАСТНОСТИ

В.В. Курганкин, С.В. Замятин, В.М. Замятин, М.И. Пушкарев

Томский политехнический университет

E-mail: kurgankin@tpu.ru

Рассмотрена возможность применения принципа динамической компенсации для синтеза встраиваемой одноконтурной системы автоматического управления с самонастраивающимся регулятором. Приведены результаты натурных экспериментов. Проведён анализ свойств робастности синтезированной системы.

Ключевые слова:

Система автоматического управления, одноконтурная система, встраиваемая система, синтез регулятора, принцип динамической компенсации, робастность, микроконтроллер.

Key words:

Automatic control system, single-circuit system, embedded system, regulator design, dynamic compensation principle, robustness, microcontroller.

Синтез регулятора системы автоматического управления (САУ) является одной из ключевых задач теории управления. Как правило, исходными данными для решения задачи синтеза являются математическое описание объекта управления и некоторые требования к функционированию синтезируемой системы. Зачастую подобные требования предъявлены только к одному или двум показателям качества функционирования системы. Синтез регулятора по таким исходным данным рассматривается в работах [1–6]. Широко распространенные инженерные методы синтеза регуляторов сводятся к аппроксимации уравнения синтеза, но не к его точной реализации. Такая аппроксимация направлена на упрощение структуры регулятора. Это приводит к снижению точности, а иногда и к невозможности решения. При этом приходится дополнительно разрабатывать алгоритмы и методы аппроксимации уравнения синтеза, что значительно усложняет задачу.

В работе рассматривается реализация алгоритмов автоматической настройки регулятора встраиваемой системы управления и её экспериментальные исследования с объектом, в качестве которого выступает двигатель постоянного тока (ДПТ).

САУ может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 1).

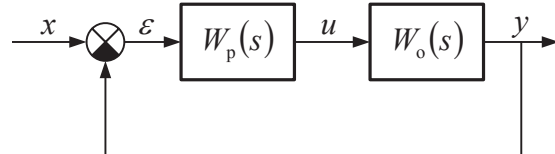


Рис. 1. Схема одноконтурной САУ: $W_o(s)$, $W_p(s)$ – передаточные функции объекта и регулятора; x и y – входной и выходной сигналы; ε – сигнал рассогласования; u – сигнал управления

Для класса стационарных систем задачу синтеза можно разделить на два этапа [1]:

- выбор эталонной передаточной функции (ПФ) системы, удовлетворяющей поставленным техническим требованиям;

- определение параметров элементов, входящих в систему управления, из условия равенства эталонной и реальной передаточной функции.

Задача состоит в автоматическом определении передаточной функции регулятора $W_p(s)$ встроеной САУ.

В математическом плане для системы, представленной на рис. 1, задача заключается в составлении и решении уравнения синтеза

$$W_{\text{ж}}(s) \cong \frac{W_p(s)W_o(s)}{1 + W_p(s)W_o(s)}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ж}}(s)$ – желаемая ПФ замкнутой системы управления.

Уравнение сформировано на основе равенства желаемой ПФ САУ $W_{\text{ж}}(s)$ и модели синтезируемой системы, представленной в правой части (1).

Для решения необходимо иметь ПФ объекта управления $W_o(s)$ и желаемую ПФ системы $W_{\text{ж}}(s)$. Первая из них известна или может быть найдена по заданному объекту. Вторая ПФ должна быть определена проектировщиком на основе требований, предъявляемых к системе.

Таким образом, составляющие формулы (1) $W_{\text{ж}}(s)$ и $W_o(s)$ известны, поэтому принципиально возможен расчёт оператора $W_p(s)$, который сводится к определению структуры регулятора и численных значений его параметров

$$W_p(s) = \frac{W_{\text{ж}}(s)}{W_o(s)(1 - W_{\text{ж}}(s))}. \quad (2)$$

Рассматриваемый в работе подход применяется для полной нейтрализации влияния динамических характеристик модели объекта на оператор замкнутой системы. Такой подход основан на принципе динамической компенсации [1, 5]. Формально зависимость (2) даёт точное решение задачи синтеза регулятора. Несмотря на это, принцип динамической компенсации не получил широкого распространения в связи с усложнением структуры САУ. Бурное развитие электроники и микропроцессор-

ной техники позволило снять вычислительные ограничения, возникающие при реализации сложных и ресурсоемких алгоритмов управления, в том числе и основанных на принципе динамической компенсации, средствами встраиваемых САУ.

Алгоритмы формирования желаемых ПФ, применяемые во встраиваемой системе управления скоростью ДПТ, основаны на методе Коновалова–Огурка [7]. Модель объекта по экспериментальным характеристикам формируется на основе подхода, изложенного в [8].

Функциональная схема установки представлена на рис. 2.

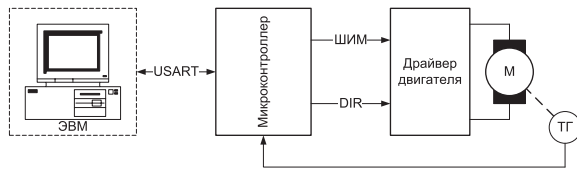


Рис. 2. Функциональная схема установки: М – ДПТ; ТГ – тахогенератор (датчик скорости); ЭВМ – электронно-вычислительная машина; USART – интерфейс связи микроконтроллера и ЭВМ; DIR – сигнал, определяющий направление вращения вала ДПТ; Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) – управляющий сигнал, задающий скорость вращения вала ДПТ

Устройство реализовано на базе микроконтроллера STM32F103. Основные характеристики: 32-разрядное ядро процессора; максимальная частота процессора 72 МГц; 512 кб ПЗУ; 64 кб ОЗУ; 12-разрядный АЦП; максимальное время выборки АЦП 1 мкс.

В качестве объекта управления используется ДПТ «Dynamo» Sliven PIVT6–25/3A со встроенным тахогенератором. Основные характеристики двигателя: напряжение питания 30 В; скорость вращения 3000 об/мин; момент вращения 0,11 Н·м; пусковой ток 4,5 А; электромеханическая постоянная времени 25 мс; электрическая постоянная времени 2 мс; момент инерции якоря двигателя $0,051 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; константа тахогенератора 3 В/1000 мин⁻¹.

В качестве драйвера двигателя используется микросхема Pololu High-Power Motor Driver 18v15. Основные характеристики драйвера: диапазон рабочих напряжений 5,5...30 В; рабочий ток ≤ 15 А; максимальная частота ШИМ 40 кГц; величина «мертвого времени» 3 мкс.

На основе предложенных алгоритмов разработано программное обеспечение, реализованное на вычислительной платформе STM32F103.

Формально процедура синтеза регулятора САУ выглядит следующим образом.

1. На объект подается тестовый сигнал.
2. Формируются векторы входных и выходных значений объекта.
3. На основе полученных векторов осуществляется структурно-параметрическая идентификация объекта с помощью вещественного интерполяционного метода [3, 8].
4. На основе заданных показателей качества формируется желаемая ПФ системы с помощью метода Коновалова–Огурка.

5. На основе выражения (2) определяется структура и параметры регулятора.

Рассмотрим работу реализованной встраиваемой системы управления.

В момент запуска устройства формируется тестовый ступенчатый сигнал, уровень которого равен 50 % от максимального (коэффициент заполнения ШИМ – 50 %, среднее значение напряжения на якоре двигателя – 15 В). Устройство запоминает вектор выходных значений скорости вращения двигателя, сформированных в результате подачи тестового сигнала. На основании полученных входных и выходных векторов данных и алгоритма структурно-параметрической идентификации формируется математическое описание объекта.

Для оценки адекватности модели используется выражение [8]

$$\Delta y = \frac{|y_m(kT_0) - y(kT_0)|}{y_{уст}} 100 \%,$$

где $y(t)$ и $y_m(t)$ – функции времени выходного сигнала объекта и модели соответственно; T_0 – период квантования; $k=1,2, \dots$ – номер отсчета, взятый на выходных характеристиках модели и объекта; $y_{уст}$ – установившееся значение снятой характеристики.

Для заданной структуры модели критерием ее адекватности является $\max(\Delta y)$.

В результате процедуры идентификации ДПТ получена следующая модель объекта

$$W_{ol}(s) = \frac{5,054 \cdot 10^{-2}}{2,773 \cdot 10^{-2} s + 1}.$$

На рис. 3 представлены результаты идентификации объекта управления.

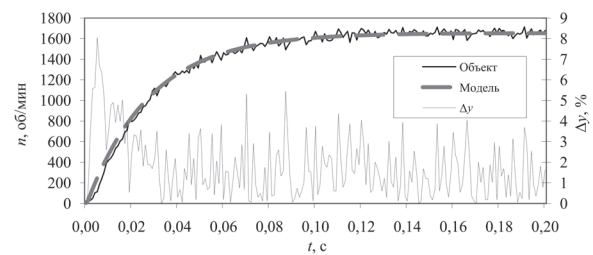


Рис. 3. Результаты идентификации объекта управления

Ошибка идентификации по заданному критерию равна 8,04 %. Расчетное время регулирования составило 0,081 с. Время, затраченное устройством для идентификации объекта, составило менее 2 с.

Следующим шагом является формирование желаемой модели синтезируемой системы по прямым показателям качества. В эксперименте задано 2 набора требований к системе, которые представлены в таблице. На их базе сформированы желаемые ПФ систем и рассчитаны регуляторы. На основании ПФ объекта, желаемой ПФ системы и (2) получаем регулятор полного порядка.

Далее осуществляется переход от непрерывной модели регулятора к дискретной на основе билинейных преобразований [9]. Это обусловлено тем,

что микроконтроллер работает дискретно. Поэтому формирование управляющего сигнала с микроконтроллера осуществляется с помощью дискретного регулятора.

На рис. 4, 5 представлены реакции систем 1, 2 (таблица) на ступенчатое воздействие.

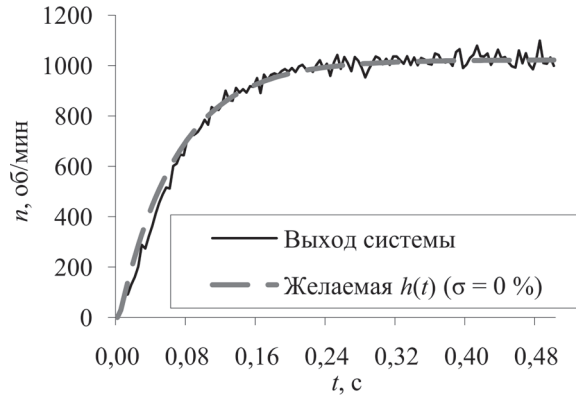


Рис. 4. Результаты синтеза регулятора системы 1

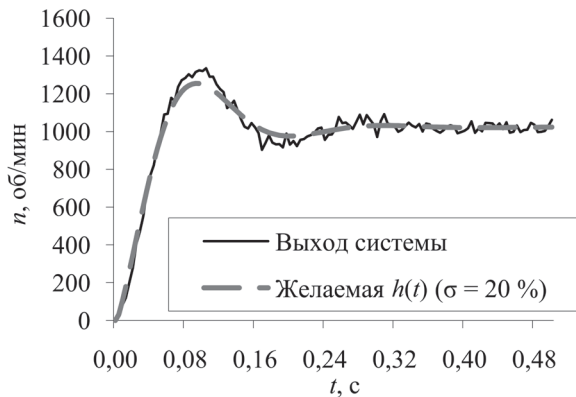


Рис. 5. Результаты синтеза регулятора системы 2

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что для заданного объекта регулирования используемые алгоритмы первоначальной автонастройки на основе метода динамической компенсации дают удовлетворительные результаты. Получаемый регулятор полного порядка способен не только обеспечить устойчивость системы, но и удовлетворительные показатели качества переходного процесса, близкие к заданным.

При использовании регулятора полного порядка, помимо получения сложной структуры регуля-

тора, возникает опасность синтеза системы, не обладающей свойствами робастности. Для оценки таких свойств проведены эксперименты над синтезированной системой управления. Для изменения параметров объекта управления использована переменная нагрузка на валу двигателя. В качестве переменной нагрузки использовались металлические диски. Момент инерции одного диска составляет $0,458 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Для оценки робастных свойств идентификационный эксперимент проводился для «номинально нагруженного» объекта, суммарный момент инерции на валу которого составляет $2,068 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. В результате идентификации получена следующая модель объекта:

$$W_{o2}(s) = \frac{4,321 \cdot 10^{-3}s + 5,126 \cdot 10^{-2}}{6,206 \cdot 10^{-2}s^2 + 1,130s + 1}.$$

Результаты идентификации представлены на рис. 6.

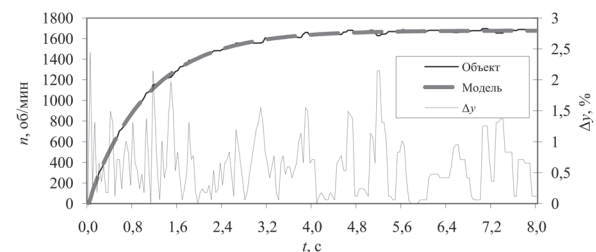


Рис. 6. Результаты идентификации «номинально нагруженного» объекта

Ошибка идентификации по заданному критерию равна 2,44 %. Расчетное время регулирования составило 3,431 с. Время, затраченное устройством для идентификации объекта, составило менее 2 с.

Для анализа робастности реализованной встраиваемой системы управления в эксперименте задано 2 набора требований к системе, которые представлены в таблице (системы 3, 4). На основе этих требований сформированы желаемые ПФ систем и рассчитаны регуляторы. После чего для рассчитанного регулятора снималась реакция системы на ступенчатое воздействие. Далее момент инерции на валу увеличивается, а затем уменьшается на 44 % относительно момента инерции «номинально нагруженного» объекта и снимается переходная характеристика системы.

Таблица. Требования к системам

№ системы	t_p , с	σ , %	Желаемая ПФ	ПФ регулятора
1	0,2	0	$\frac{6,67 \cdot 10^{-2}s + 1}{4,44 \cdot 10^{-3}s^2 + 1,33 \cdot 10^{-1}s + 1}$	$\frac{1,85 \cdot 10^{-3}s^2 + 9,44 \cdot 10^{-2}s + 1}{2,25 \cdot 10^{-4}s^2 + 3,37 \cdot 10^{-3}s}$
2	0,2	20	$\frac{1,38 \cdot 10^{-2}s + 1}{9,24 \cdot 10^{-4}s^2 + 2,77 \cdot 10^{-2}s + 1}$	$\frac{3,84 \cdot 10^{-4}s^2 + 4,16 \cdot 10^{-2}s + 1}{4,67 \cdot 10^{-5}s^2 + 7,01 \cdot 10^{-4}s}$
3	4,0	0	$\frac{1,33s + 1}{1,78s^2 + 2,67s + 1}$	$\frac{8,28 \cdot 10^{-2}s^3 + 1,57s^2 + 2,46s + 1}{7,68 \cdot 10^{-3}s^3 + 9,69 \cdot 10^{-2}s^2 + 6,84 \cdot 10^{-2}s}$
4	4,0	20	$\frac{2,77 \cdot 10^{-1}s + 1}{3,70 \cdot 10^{-1}s^2 + 5,54 \cdot 10^{-1}s + 1}$	$\frac{1,72 \cdot 10^{-2}s^3 + 3,75 \cdot 10^{-1}s^2 + 1,41s + 1}{1,60 \cdot 10^{-3}s^3 + 2,01 \cdot 10^{-2}s^2 + 1,42 \cdot 10^{-2}s}$

Обозначения: t_p – желаемое время регулирования; σ – желаемое перерегулирование.

На рис. 7, 8 представлены реакции систем 3, 4 (таблица) на ступенчатое воздействие.

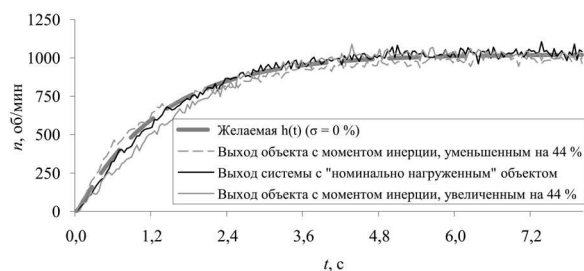


Рис. 7. Результаты работы синтезированного регулятора системы 3

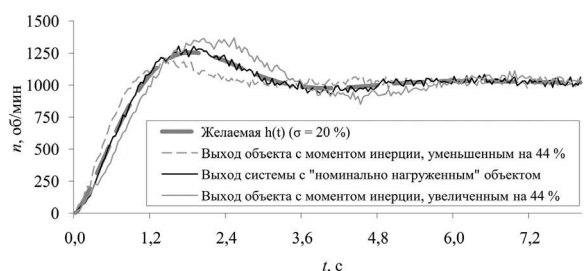


Рис. 8. Результаты работы синтезированного регулятора системы 4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5-ти т.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Пупкова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 616 с.
2. Клюев А.С., Карпов В.С. Синтез быстродействующих регуляторов для объектов с запаздыванием. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.
3. Алексеев А.С., Антропов А.А., Гончаров В.И., Замятин С.В., Рудницкий В.А. Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 217 с.
4. Белихмайер М.Я., Гончаров В.И. Синтез корректирующих устройств систем автоматического управления на основе равномерного приближения // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 5. — С. 3–11.

Анализ графиков (рис. 7, 8) показал, что разработанная система и алгоритмы, заложенные в ней, способны решать задачу не только первоначальной автонастройки системы, но и задачи управления объектами с переменными параметрами.

Разработанная встраиваемая САУ с функцией начальной автонастройки, реализующей принцип динамической компенсации, может успешно применяться для управления широким классом технических объектов на различных производствах и в народном хозяйстве.

Выводы

В результате серии натурных экспериментов над системой управления, объектом в которой выступает двигатель постоянного тока, можно сделать вывод, что регулятор полного порядка, реализованный на базе микроконтроллера, способен успешно решать задачу стабилизации динамических свойств систем с постоянными и переменными параметрами объекта. Параметры объекта могут варьироваться в широком диапазоне значений ($\pm 44\%$ от номинальных).

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 396 с.
6. Nuapett Sarasiri, Arthit Srikaew, Sarawut Sujitjorn. Dynamic Compensation of Hard-Disk R/W Head and Head-Stack // WSEAS Transactions on Systems. — 2010. — V. 9. — Iss. 7. — P. 764–773.
7. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / под ред. А.А. Воронова, И.А. Огурка. — М.: Наука, 1984. — 343 с.
8. Курганкин В.В., Замятин С.В., Алексеев А.С. Применение встраиваемых систем управления для решения задачи идентификации // Известия Томского политехнического университета. — 2011. — Т. 319. — № 5. — С. 39–42.
9. Стародубцев Д.О. Билинейное преобразование // Википедия — свободная энциклопедия. 2006 URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Билинейное_преобразование (дата обращения: 26.11.2012)

Поступила 03.10.2012 г.