

9. Bezhitskiy, S. S. Vyibor optimalnoy strukturyi apparatno-programmnogo kompleksa sistemyi upravleniya dvizheniem avtomobilnogo transporta [Text] / S. S. Bezhitskiy // Vestnik universitetskogo kompleksa. – 2005. – Vol. 6, Issue 20. – P. 168–173.
10. Mihaylov, V. V. Nadezhnost elektrosnabzheniya promyshlennyih predpriyatiy [Text] / V. V. Mihaylo. – Energiya, 1973. – 167 p.
11. Lutsenko, I. Identification of target system operations. Determination of the time of the actual completion of the target operation [Text] / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. - Vol. 6, Issue 2 (72). – P. 42–47. doi: 10.15587/1729-4061.2014.28040
12. Sposib selektsiyi ob'ektiv : Patent 59203 Ukraina [Text] / Lutsenko I. A. – MKI G06K 9/00; zayavitel i patentoobladatel Lutsenko I. A. – 20021210028; zayavl. 12.12.2002; opubl. 15.11.2005, Byul. 11. – 1 p.
13. Lutsenko, I. A. Samples [Electronic resource] / I. A. Lutsenko. – Krivoy Rog, 2014. – Available at: <http://uk.egli.info/index.php/systems-engineering-samples>

Пропонується підхід до побудови інваріантних відносно зовнішніх збурень систем управління. На відміну від класичної схеми тут не потрібно вимірювати обурення. Можливість безмежного збільшення коефіцієнта посилення робастного регулятора без втрати стійкості дозволяє зменшити вплив збурень до як завгодно малої величини. Цим забезпечується висока точність стеження еталонної траєкторії і швидкодія для широкого класу збурень

Ключові слова: система управління, інваріантна система, невизначеність, функція Ляпунова, робастний регулятор, обурення

Предлагается подход к построению инвариантных относительно внешним возмущениям систем управления. В отличие от классической схемы здесь не требуется измерять возмущения. Возможность беспредельного увеличения коэффициента усиления робастного регулятора без потери устойчивости позволяет уменьшить влияние возмущений до сколь угодно малой величины. Этим обеспечивается высокая точность слежения эталонной траектории и быстродействие для широкого класса возмущений

Ключевые слова: система управления, инвариантная система, неопределенность, функция Ляпунова, робастный регулятор, возмущение

УДК 519.7:681.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37177

ПОСТРОЕНИЕ СЛЕДЯЩИХ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Г. А. Рустамов

Доктор технических наук, профессор
Кафедра «Автоматика и управление»
Азербайджанский Технический Университет
пр. Г. Джавида, 25,
г. Баку, Азербайджан, Az1073
E-mail: gazanfar.rustamov@gmail.com

1. Введение

Одним из эффективных и простых методов повышения точности систем автоматического регулирования является принцип инвариантности или принцип управления по возмущению [1–5]. При этом основной задачей является обеспечение инвариантности относительно к внешним возмущениям, действующих на объект.

Следует отличать астатические системы от инвариантных. В астатических системах возмущение не измеряется и полная компенсация статической ошибки Δ_s за счёт обратной связи достигается в пределе: $\Delta_s = \lim_{t \rightarrow \infty} (t) = 0$.

В инвариантных системах компенсация возмущения происходит почти мгновенно. Однако построение хотя приближенно инвариантной системы, в которой

удовлетворяется лишь нестрогие (ослабленные) условия инвариантности, за счёт обратной связи наталкивается на принципиальные трудности. В классических задачах эта проблема решена путем измерения возмущения и воздействия на тот же объект через *инверсный регулятор* (компенсатор), находящийся во втором канале вне обратной связи.

Как и во многих областях, комбинированный подход несколько улучшает положение: за счёт обратной связи компенсируются неконтролируемые возмущения, а подавление доминирующих измеряемых возмущений возлагается на компенсатор [3].

На практике «измерение» в зависимости от физической природы возмущения может оказаться проблематичным из-за следующих причин: отсутствие методики измерения; сложность и слабое быстродействие измерительной системы, а также её габариты и вес;

известные трудности измерения и обработки нелинейных нестационарных сигналов.

Многие технические и технологические объекты допускают измерение внешнего возмущения с помощью стандартных средств. Не смотря на это, при реализации инвариантных систем главной проблемой остается обеспечение реализуемости компенсатора. Эта особенность характерна для всех инверсных регуляторов, особенно в случаи нелинейных систем [6].

В связи с сказанным, построение инвариантных систем управления для широкого класса возмущений без их измерения и оценки (идентификации) является весьма актуальной проблемой. Конечно, эти системы могут называться не инвариантными, а, например, – *робастными системами*.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Развитие фундаментальных основ теории и практики инвариантных относительно внешним возмущениям систем управления связаны с именами русских ученых Г. В. Щипанова [7] (1936) и академика Б. Н. Петрова [8–10] (1955).

Принцип двухканальности Б. Н. Петрова, являющийся основой технической реализуемости математических условий Г. В. Щипанова предусматривает выполнения двух требований: удовлетворения структурного признака и необходимость измерения внешнего возмущения [8–10].

В определенных условиях проблему измерения удается решить путем измерения компаундированных переменных объекта, косвенно характеризующих внешние возмущения [11–12].

Одним из основных требований, возлагаемым на реализуемость компенсатора является выполнение известного соотношения между запаздываниями в каналах управления и возмущения. Для обеспечения реализуемости компенсатора используются ряд подходов, среди которых выделим следующие: аппроксимация передаточной функции в рабочем диапазоне частот звеном пониженного порядка; в случае появления при $n < m$ операторов идеального дифференцирования их замена реальными дифференцирующими звеньями. В системах большого порядка аппроксимация может привести к значительным погрешностям [5].

Построение универсальных следящих астатических систем управления для широкого класса эталонных сигналов $y_d(t)$ является довольно сложной задачей. Причиной тому является зависимость уравнения регулятора от типа эталонного сигнала. Для определенного класса эталонных траекторий $y_d(t)$ удается построить единый астатический регулятор. Так, при полиномиальном сигнале $y_d(t) = g_0 + g_1 t + g_2 t^2 + \dots + g_k t^k$ используется астатический регулятор $(k+1)$ -го порядка, состоящего из последовательно соединенных $(k+1)$ интеграторов и пропорциональной части. В случаи ступенчатого эталонного сигнала $y_d(t) = g_0 1(t)$ – это широко используемый PI- регулятор (астатический регулятор первого порядка).

Общим правилом обеспечения астатизма как относительно к $y_d(t)$, так же к внешнему возмущению является то, что *среди нулей передаточной функции*

замкнутой системы по ошибке должны находиться все полюсы изображения эталонного сигнала и возмущения. Этим обеспечивается компенсация (сокращение) нулей с полюсами.

При построении инвариантных систем используется похожая технология, однако для технической реализации требуется измерение эталонного сигнала и возмущения. Тем не менее, компенсация возмущений на основе принципа инвариантности является эффективным инженерным решением, приводящим к простым и понятным регуляторам, востребованных в технике и промышленности. Не зависимость передаточной функции компенсатора от типа возмущений и автономность относительно устойчивости замкнутого контура являются основным достоинством инвариантных систем.

В данной работе предлагается альтернативный подход без измерения возмущений, основанный на простом соображении – увеличение коэффициента усиления разомкнутой цепи. В системах с обратной связью ошибка регулирования обратно пропорционально этому коэффициенту. Поэтому увеличивая коэффициент усиления ошибку можно уменьшить до сколь угодно малой величины.

По-видимому, способ технической реализации этого подхода без нарушения устойчивости замкнутой системы впервые был предложен М. В. Мееровым [13, 14] (1947). Тем не менее, классические методы в указанном направлении не нашли должного развития в основном по следующим причинам:

- сложность аналоговых структур, обеспечивающих беспредельное увеличение коэффициента усиления без нарушения устойчивости;
- частный характер полученных результатов;
- применимость только к линейным системам;
- низкая репутация «большого коэффициента», в пределах классической элементной базы.

Эффект большого коэффициента усиления можно получить путем организации автоколебательных и скользящих режимов [15, 16]. Однако высокочастотное разрывное колебания сигнала управления ограничивает область применения этих режимов.

3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является синтез следящей инвариантной системы без измерения внешнего возмущения. Основу методики составляет «эквивалентное робастное управление» предложенное в [17, 18] для неопределенных объектов. Возможность беспредельного увеличения коэффициента усиления аналогового регулятора позволяет подавлять неопределенные генеральные составляющие нелинейной модели и неконтролируемые ограниченные внешние возмущения, до сколь угодно малой величины. Этим обеспечивается высокое быстродействие и точность слежения эталонной траектории.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- использование метода функции Ляпунова с целью синтеза робастного регулятора, допускающего беспредельное увеличение коэффициента усиления без нарушения устойчивости системы;

- использование «эквивалентного робастного управления» для компенсации за конечное время неконтролируемого внешнего возмущения;
- разработка методики настройки регулятора, обеспечивающего выполнения наперёд заданных значений допустимой ошибки слежения и времени установления;
- компьютерное исследование и сравнительный анализ полученных теоретических результатов.

4. Определение математической модели и формулировка задачи регулирования

Объектом управления является одномерный по входу и выходу объект n -го порядка с известной структурой:

$$y^{(n)} = f(y) + b(y)u + \phi(v, \dot{v}, \dots, v^{(m)}), \tag{1}$$

где $y = (y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)})^T \in R^n$ – доступный измерению или оценке вектор состояния; $y \in R$ – управляемый выход; $u \in R$ – управляющее воздействие, подлежащее определению; $f(y), b(y)$ – нелинейные неизвестные ограниченные функции (генеральные составляющие неопределенной модели); $\phi(t)$, $m \leq n$ – ограниченная функция своих аргументов; $v(t)$ – неконтролируемое внешнее возмущение.

Предполагается, что во время функционирования параметры и вид функций $f(\cdot)$ и $g(\cdot)$, а также $v(t)$ могут изменяться в широких пределах.

Задача управления заключается в построение такого управления u , которое после завершения переходной составляющей обеспечивает отслеживание выхода $y(t)$ объекта (1) эталонной траектории $y_d(t)$, с заданной точностью $|e(t)| \leq \delta_s, \forall t \geq t_s$ и для любых начальных условий.

Здесь $e(t) = y_d(t) - y(t)$ – ошибка слежения; δ_s, t_s – заданные допустимая ошибка и время установления переходной составляющей.

5. Синтез робастного регулятора и особенности движения системы при большом коэффициенте усиления

В [17, 18] управление, обеспечивающее достаточное условие устойчивости $dV(e)/dt < 0$ получено в виде:

$$u(t) \equiv u_{Req} = ks(t) = k(c_1 e + c_2 \dot{e} + \dots + e^{(n-1)}). \tag{2}$$

Здесь $V = \frac{1}{2}s^2$ – функция Ляпунова; $s=0$ – многообразие, характеризующее гиперплоскость; k – достаточно большое число (коэффициент усиления регулятора); $c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, k$ – параметры настройки регулятора.

При устремлении k в бесконечность в пределе замкнутая система описывается уравнением гиперплоскости

$$s = c_1 e + c_2 \dot{e} + \dots + e^{(n-1)} = 0, \quad s(0) = s_0. \tag{3}$$

По аналогии с [19] управление (2) назван «робастным эквивалентным управлением». Предложенное в [19], для полностью определенных объектов, эквива-

лентное управление u_{eq} (эквивалентное управление Уткина–Драженевича [19, 20]) обеспечивает движение системы в начало координат лишь из точек, расположенных на гиперплоскости $s=0$. «Робастное эквивалентное управление» (2) при достаточно большом коэффициенте усиления k обеспечивает движение системы в начало координат из произвольного начального условия $s(0) = s_0$.

На рис. 1 показан фазовый портрет системы при $n=2$ и достаточно большом коэффициенте усиления k .

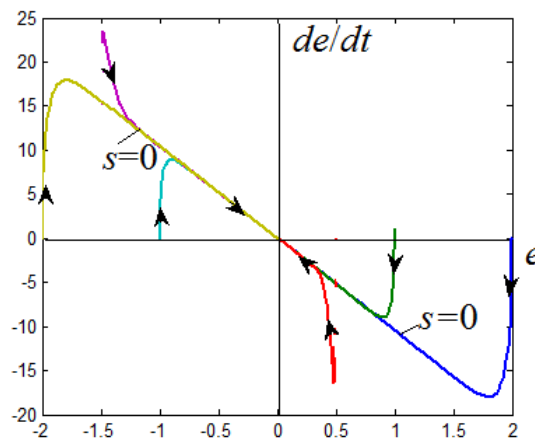


Рис. 1. Фазовый портрет системы с «робастным эквивалентным управлением»

При движении из произвольной точки $s(0) = s_0$ система при достаточно большом коэффициенте усиления k почти мгновенно попадает на гиперплоскость $s=0$ и в дальнейшем двигается по этой плоскости в начало координат. Поэтому движение системы может быть описано уравнением гиперплоскости $s=0$.

6. Определение параметров настройки для монотонной переходной характеристики

6. 1. Определение параметров гиперплоскости $c_i, i=1,2,\dots,n-1$

Качественные показатели (время установления t_s , перерегулирование σ % и др.) переходной характеристики по ошибке $e(t)$ зависят от параметров настройки $c_i, i=1,\dots,n-1$ регулятора (2). Поскольку порядки регулятора и характеристического уравнения замкнутой системы равны, то путем подбора параметров $c_i, i=1,\dots,n-1$ можно разместить все полюса системы по желаемой схеме.

Общая методика расчёта параметров $c_i, i=1,2,\dots,n-1$, обеспечивающих монотонность (σ %) переходной характеристики изложена в [16]. Для $n=2$ имеем один параметр настройки c_1 , который после определения полюса p_1 из решения трансцендентного уравнения

$$f(p_1) = e(0) \exp(-p_1 t_s) \mp \delta_s / 100 = 0 \tag{4}$$

определяется как $c_1 = p_1$.

В (4) δ_s и t_s , соответственно, заданные ошибка и время установления. Если $e(0) > 0$, то и $\delta_s > 0$ (приближение сверху), иначе $\delta_s < 0$.

Уравнение (4) можно решить с помощью функции Matlab: `solve('f(p1)=0')`.

6. 2. Определение коэффициента усиления регулятора, k .

Этот параметр связан с объектом и настраивается на доминирующий источник, вызывающий максимальное отклонение ошибки $e(t)$ от заданного δ_s . Поэтому k определяется экспериментально при компьютерном моделировании или на реальном объекте.

После некоторого значения k в системе устанавливаются заданные $\sigma\%$ и t_s . Однако не следует злоупотреблять значением k , поскольку это может привести к перерасходу энергии. Если энергия управления строго регламентирована, то целесообразно использовать самонастройку k в зависимости от ошибки $e(t)$, поддерживая k на минимальном уровне.

7. Результаты компьютерного моделирования и сравнительный анализ

Пример. Рассмотрим управляемый объект с неизвестными генеральными составляющими и неконтролируемым внешним гармоническим возмущением [21]:

$$\ddot{y} = -0.5\dot{y} - y + 2u + \phi(t).$$

$$\text{Здесь } f(y) = \ddot{y} = -0.5\dot{y} - y + 2u + \phi(t), b(y) = 2;$$

$$\phi(t) = v(t) + 0.4\dot{v}(t), v(t) = \sin(10t).$$

Передаточные функции объекта по каналу управления и возмущения соответственно имеют вид:

$$W_u = \frac{2}{s^2 + 0.5s + 1}, \quad W_v = \frac{0.4s + 1}{s^2 + 0.5s + 1}.$$

Передаточная функция компенсатора

$$W_k = \frac{W_v}{W_u} = \frac{0.4s + 1}{2} \approx \frac{0.205s + 0.5}{0.01s + 1}.$$

При сравнении использован PID-регулятор, который для системы 2-го порядка при ступенчатом эталонном сигнале $y_d(t) = 1(t)$ обеспечивает размещение всех полюсов по желаемой схеме.

На рис. 2, *a*, *б* показаны переходные характеристики $y_1(t)$ и $y_2(t)$ для классической инвариантной системы при $k_p=10$, $k_i=1$, $k_d=4$ и предложенной без измерения возмущения при настройке $c_1=4$, который соответствует $\delta_s = 2\%$, $t_s = 1$ с и $k=120 \Rightarrow u_{Req} = 120(\dot{e} + 4e)$. В обоих случаях эталонной траекторией является единичный скачек $y_d(t) = 1(t)$.

Как видно из рис. 2, *a* несмотря на то, что возмущение не измеряется, использование эквивалентного робастного управления u_{Req} позволило получить улучшенный результат.

На рис. 3 показана соответствующая схема, реализованная на Simulink.

На рис. 4, *a* и *б* показаны характеристики системы в случае эталонной траектории в виде последовательности прямоугольных импульсов. Параметры настройки робастного регулятора $c_1 = 20, k = 200$.

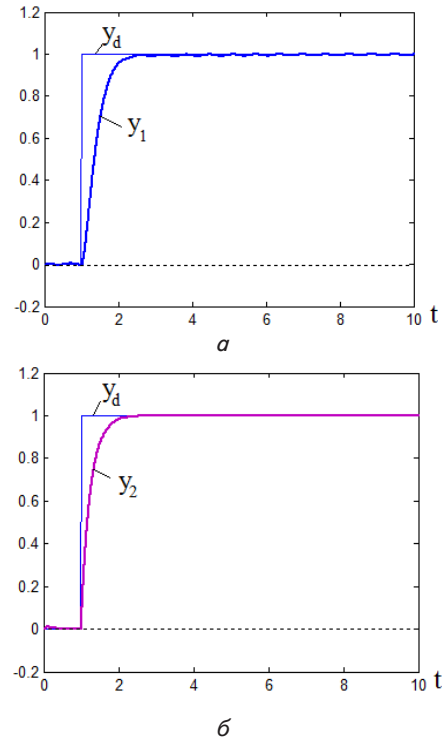


Рис. 2. Переходные характеристики инвариантных систем: *a* – результат моделирования по классической схеме; *б* – результат моделирования с использованием робастного регулятора и без измерения возмущения

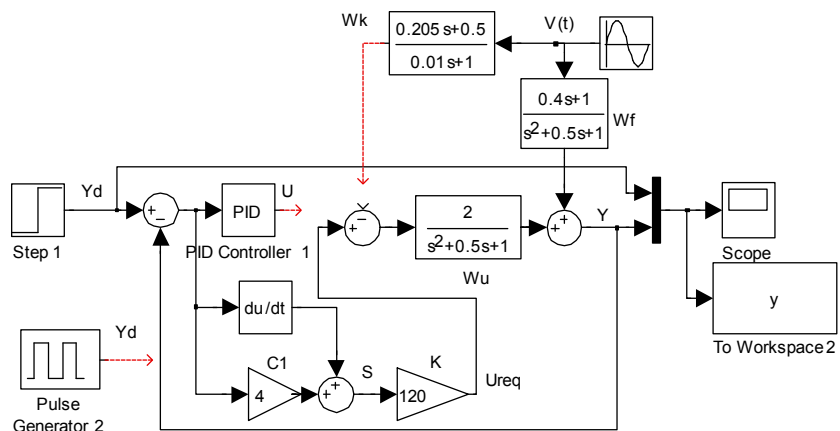


Рис. 3. Схема реализации предложенной следящей инвариантной системы

Улучшение показателей качества достигнуто за счет увеличения углового коэффициента вырожденной линии (траектории) $s = 0$ и углового коэффициента k робастного регулятора.

На рис. 5, *a*, *б* показаны соответствующие сигналы управления.

Эквивалентное робастное управление позволяет обрабатывать внешнее возмущение $v(t) = \sin(10t)$ бо-

лее точно, что отражается в точности слежения эталонной траектории (рис. 4, б).

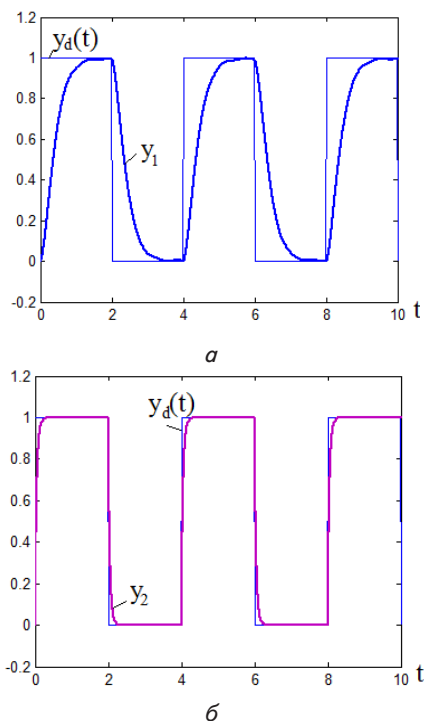


Рис. 4. Переходные характеристики инвариантных систем в случае эталонной траектории в виде последовательности прямоугольных импульсов: а – результат моделирования по классической схеме; б – результат моделирования с использованием робастного регулятора $u_{req} = 200(\dot{e} + 20e)$ и без измерения возмущения

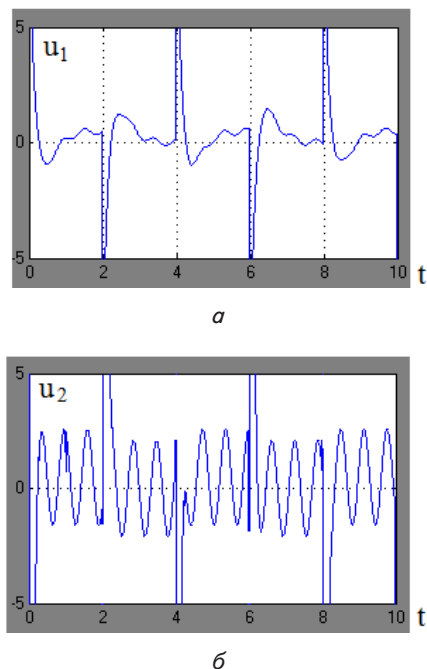


Рис. 5. Сигналы управления в инвариантных системах в случае эталонной траектории в виде последовательности прямоугольных импульсов: а – PID- управление; б – эквивалентное робастное управление

8. Выводы

В работе предложен один из возможных подходов к построению робастной инвариантных систем управления без измерения внешнего возмущения. Возможность беспредельного увеличения коэффициента усиления регулятора без потери устойчивости позволяет подавлять генеральные составляющие неопределенных моделей и возмущения до сколь угодно малой величины. Этим обеспечивается высокая точность слежения эталонной траектории для широкого класса внешних возмущений.

Главной особенностью метода является использование нового типа управления – «робастного эквивалентного управления».

К недостаткам предложенной методики можно отнести:

- отсутствие аналитической формулы для определения коэффициента усиления k ;
- использование производных выхода для формирования PD-регулятора;
- низкая помехозащищенность по отношению к высокочастотным помехам, имеющим непосредственный доступ в регулятор;

Решение модельных задач с использованием пакета *Matlab/Simulink* позволило сделать ряд положительных выводов, имеющих важное практическое значение.

Литература

1. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления [Текст] / под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Из-во МГТУ, 2000. – 736 с.
3. Бесекинский, В. А. Теория систем автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекинский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 2003. – 752 с.
4. Кориков, А. М. Основы теории управления [Текст] / А. М. Кориков. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 392 с.
5. Рустамов, Г. А. Теория автоматического регулирования: моделирование в Matlab/Simulink [Текст] / Г. А. Рустамов. – Баку: Из-во АзГУ, 2012. – 752 с.
6. Дорф, Р. К. Лаборатория знаний [Текст] / Р. К. Дорф, Р. Х. Бишоп, Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ, 2004. – 911 с.
7. Щипанов, Г. В. Теория и методы проектирования регуляторов [Текст] / Г. В. Щипанов // Автоматика и телемеханика. – 1939. – № 1. – С. 49–66.
8. Петров, Б. Н. О применимости условий инвариантности [Текст] / Б. Н. Петров // Труды Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования. – 1955. – Т. 2. – С. 241–246.
9. Петров, Б. Н. О реализуемости условий инвариантности [Текст]: тр. 1-го Всес. совещ. / Б. Н. Петров // Теория инвариантности и её применение в автоматических устройствах. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 59–80.
10. Petrov, B. N. Invariance principle and its application conditions in designing of linear nonlinear systems [Text] / B. N. Petrov // Proc. of the 1 International Congress of IFAC, AN SSSR, 1961. – P. 259–271.

11. Kulebakin, V. S. High quality invariant control systems. In the book «Theory of invariance and its application in automatic devices» [Text] / V. S. Kulebakin. – Moscow: Publ.AN SSSR, 1959. – P. 11–39.
12. Менский, Б. М. Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении [Текст] / Б. М. Менский. – М.: Машиностроение, 1972. – 248 с.
13. Мееров, М. В. Системы автоматического управления, устойчивые при бесконечно больших коэффициентах усиления [Текст] / М. В. Мееров // Автоматика и телемеханика. – 1947. – Т. 8, № 4. – С. 225–243.
14. Мееров, М. В. Синтез структур систем автоматического управления высокой точности [Текст] / М. В. Мееров. – М.: Наука, 1967. – 423 с.
15. Бейнарович, В. А. Инвариантные системы автоматического управления [Текст] / В. А. Бейнарович // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21), часть 1. – С. 70–73.
16. Мамедов, Г. А. Устранение нарушения скользящего режима при вынужденном движении управляемых объектов [Текст] / Г. А. Мамедов, Г. А. Рустамов, З. Р. Гасанов // Автоматика и вычислительная техника. – 2009. – № 2. – С. 28–36.
17. Rustamov, G. A. Absolutely robust control systems [Text] / G. A. Rustamov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – Vol. 47, Issue 5. – P. 227–241. doi: 10.3103/s0146411613050052
18. Рустамов, Г. А. Робастная система управления с повышенным потенциалом [Текст] / Г. А. Рустамов // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324, № 5. – С. 13–19.
19. Уткин, В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления [Текст] / В. И. Уткин. – М.: Наука, 1981. – 368 с.
20. Drazenovic, B. The invariance conditions in variable structure systems [Text] / B. Drazenovic // Automatica. – 1969. – Vol. 5, Issue 3. – P. 287–295. doi: 10.1016/0005-1098(69)90071-5
21. Rustamov, G. A. Invariant control systems of second order [Text] / G. A. Rustamov // IV International Conference «Problems of Cybernetics and Informatics (PCI'2012)». – Azerbaijan. – 2012. – Vol. 4. – P. 22–24. – Available at: www.pci2012.science.az/7/07.pdf. doi: 10.1109/icpci.2012.6486428

Досліджено та синтезовано безпошукову адаптивну систему керування методом функції Ляпунова нестационарним об'єктом в умовах зашумленості вимірюваних величин з використанням спостерегаючого пристрою. Розроблено модель в програмному пакеті MATLAB/Simulink. На основі моделювання виконано дослідження працездатності запропонованої моделі при різному характері зміни параметрів об'єкту керування

Ключові слова: адаптивні системи керування, безпошукові системи, метод функції Ляпунова, спостерегаючий пристрій, MATLAB

Исследована и синтезирована беспоисковая адаптивная система управления методом функции Ляпунова нестационарным объектом в условиях зашумленности измеряемых величин с использованием наблюдающего устройства. Разработана модель в программном пакете MATLAB/Simulink. На основе моделирования выполнены исследования работоспособности предложенной модели при различном характере изменения параметров объекта управления

Ключевые слова: адаптивные системы управления, беспоисковые системы, метод функции Ляпунова, наблюдающее устройство, MATLAB

УДК 681.513.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37797

СИНТЕЗ БЕЗПОШУКОВОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ ФУНКЦІЇ ЛЯПУНОВА З ВИКОРИСТАННЯМ СПОСТЕРЕГАЮЧОГО ПРИСТРОЮ

А. В. Писаренко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: andrew.pisarenko@gmail.com

М. П. Татауров*

E-mail: suratasan@mail.ru

*Кафедра автоматики та

управління в технічних системах

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Створення і вдосконалення систем автоматизації є однією з важливих проблем, вирішення якої багато

в чому визначає рівень розвитку науки в цілому. Тому задача створення якісно нових систем автоматизації, що забезпечують високу точність керування та адаптації, є актуальною. Умови роботи реальних систем управлін-