

- 30.10.13; opubl. 10.07.2014, Bjul. № 19.
9. Pat. 159034 Rossijskaja Federacija, MPK7 F21K 99/00. Ustanovka osvetitel'naja svetodi-odnaja s izmenjaemoj svetocvetovoj sredoj / *Ashrjatov A.A., Vishnevskij S.A.*; zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogareva». – № 2014147714/07; zajavl. 26.11.2014; opubl. 27.01.2016, Bjul. № 3.
  10. Pat. 168490 Rossijskaja Federacija, MPK7 F21V 33/00. Fitosvetil'nik dlja uluchshennogo rosta rastenij / *Orlov K.A.*; zajavitel' i patentoobladatel' Orlov Kirill Aleksandrovich. – № 2016121937; zajavl. 02.06.2016; opubl. 06.02.2017, Bjul. № 4.
  11. *Gavrilenko A.P.* Svetodiodnyj svet dlja teplic. Associacija «Teplicy Rossii». – URL: [http://rusteplika.ru/publikacii/pribory-](http://rusteplika.ru/publikacii/pribory-oborudovanie/svetodiodnyj-svet-dlja-teplic-enova-l.htm)
  12. Pat. 92250 Rossijskaja Federacija, MPK7 A01G 9/24. Svetodiodnyj osvetitel' rastenij (SIDOR) / *Markov V.N.*; zajavitel' i patentoobladatel' Markov Valerij Nikolaevich. – № 2009133013/22; zajavl. 03.09.2009; opubl. 10.02.2010, Bjul. № 4.
  13. GOST R 54350-2015. Pribory osvetitel'nye. Svetotehničeskie trebovanija i metody ispytanij. – M.: Standartinform, 2015. – 42 s.
  14. *Knorring G.M., Fadin I.M., Sidorov V.N.* Spravochnaja kniga dlja proektirovanija jelektрического освещенія, – 2-e izd., pere- rab. i dop. – SPb.: Jenergoatomizdat, 1992. – 448 s.
  15. *Husenov G.N., Sanginov M.H., Dolgih P.P.* Sravnitel'naja ocenka teplichnyh obluchatel'nyh ustanovok // *Jepoha nauki.* – 2016. – № 8. – S. 215–219.



УДК 681.586

**В.В. Кибардин, О.А. Ковалева**

## СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**V.V. Kibardin, O.A. Kovaleva**

### THE SYNTHESIS OF CONTROLLERS UNDER INTERVAL UNCERTAINTY

**Кибардин В.В.** – канд. техн. наук, доц. каф. электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: [kovalevao47@mail.ru](mailto:kovalevao47@mail.ru)

**Ковалева О.А.** – доц. каф. электрификации горно-металлургического производства Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: [kovalevao47@mail.ru](mailto:kovalevao47@mail.ru)

**Kibardin V.V.** – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Electrification of Mining and Metallurgical Production, Institute of Mining, Geology and Geotechnologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: [kovalevao47@mail.ru](mailto:kovalevao47@mail.ru)

**Kovaleva O.A.** – Assoc. Prof., Chair of Electrification of Mining and Metallurgical Production, Institute of Mining, Geology and Geotechnologies, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: [kovalevao47@mail.ru](mailto:kovalevao47@mail.ru)

*Решена задача анализа и синтеза системы «тиристорный преобразователь–двигатель» в условиях интервальной неопределенности сопротивления и индуктивности обмоток,*

*момента инерции и т.д. Определены их границы, зависящие от конструктивных особенностей и условий эксплуатации. Рассмотрено влияние интервальных неопределенностей на*

частотные и переходные характеристики объекта управления. С учетом этого был выбран метод решения задачи – математическое моделирование в среде MATLAB с помощью Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. При выбранных интервалах неопределенностей угловая скорость изменяется в диапазоне от 6,42 до 14,9 с<sup>-1</sup> при номинальной 13,0 с<sup>-1</sup>. Переходные процессы монотонные, объект управления робастно устойчив и наиболее чувствителен к изменению параметров тиристорного преобразователя. Установлено, что регуляторы, выбранные по критерию модульного оптимума и номинальным данным привода, не обеспечивают заданные показатели качества: перерегулирование по току до 17 %, по скорости – до 60 %, время регулирования по току изменяется от номинального значения от 0,031 до 0,087 с, по скорости – от 0,06 до 0,18 с. Переходные процессы носят колебательный характер. Переход к робастным регуляторам, параметры которых выбраны с помощью функции [PeakGain, Uwc]=wcgain(...), позволил снизить перерегулирование по току до 4,3 %, по скорости – до 14 %, при этом время переходного процесса по скорости увеличилось до 0,29 с. Робастность системы обеспечивается за счет снижения её быстродействия по сравнению с номинальной. Рассмотрен второй вариант – система с адаптивными регуляторами. Она обеспечивает заданные показатели качества во всем диапазоне интервальной неопределенности по критериям модульного и симметричного оптимумов.

**Ключевые слова:** интервальная неопределенность, робастная устойчивость и качество, робастный регулятор, система робастного управления, критерии модульного и симметричного оптимумов, прямые показатели качества, адаптивный регулятор, адаптивная система управления.

*The task of the analysis and synthesis of system of “thyristor converter – engine” in the conditions of interval uncertainty of resistance and inductance of windings, inertia moment, etc. has been solved. Their borders depending on the design features and service conditions are defined. The influence of interval uncertainty on frequency and transitional*

*characteristics of object of management is considered. Taking into account it the method of the solution of the task is mathematical modeling in the environment of MATLAB by means of Control System Toolbox and Robust Control Toolbox was chosen. At the chosen intervals of uncertainty angular speed changes in the range from 6.42 to 14.9 s<sup>-1</sup>, at nominal – 13.0 s<sup>-1</sup>. Transition processes is monotonous, the object of management is robust steady and most sensitive to change of parameters of the thyristor converter. It is established that the regulators chosen by criterion of modular optimum and ratings of the drive do not provide the set quality indicators: reregulation on current – to 17 %, its speed is up to 60 %, regulation time on current changes from nominal rate from 0.031 to 0.087 s, on speed – from 0.06 to 0.18 s. Transition processes have oscillatory character. Transition to robust regulators which parameters are chosen by means of function [PeakGain, Uwc]=wcgain(...), allowed reducing reregulation on current to 4.3 %, on speed – to 14 %, thus the time of transition process on speed increased to 0.29 s. Robustness of the system is provided due to the decrease in its speed in comparison with nominal. The second option is the system with adaptive regulators. It provides the set quality indicators in all range of interval uncertainty by criteria of modular and symmetric optimum.*

**Keywords:** interval uncertainty, robust stability and quality, robust controller, robust control system, criteria modular and symmetric optimum, direct quality indicators, adaptive controller, adaptive control system.

**Введение.** Анализ и синтез систем управления электромеханическими объектами выполняются для систем с точным математическим описанием и систем с неопределенностями. В первом случае регулятор должен учитывать неконтролируемые изменения свойств объекта управления в процессе эксплуатации. Для управления объекта с переменными параметрами можно применять адаптивные системы управления с контуром адаптации. Одновременно с управлением происходит изучение объекта с использованием обратной связи. Информация о поведении объекта управления используется для перестройки алгоритмов адаптации и управления, структуры, параметров регулятора и обратной связи. Отсюда можно сде-

лать вывод: ограниченному множеству объектов управления будет соответствовать ограниченное множество корректирующих устройств [1].

Естественно задаться таким вопросом – существует ли единственный регулятор, с помощью которого можно управлять объектом с неопределенностями? Если да, то такой корректор и система управления называются *грубыми*. Впоследствии вместо этого термина стал использоваться термин «робастность» – от английского слова *robust* – крепкий, здоровый, сильный.

Поскольку ни одна математическая модель не может точно отражать физическую систему, необходимо знать, как ошибки модели могут повлиять на качество системы управления. Неопределённость модели (объекта) удобно выражать в терминах принадлежности модели (объекта) к ограниченному множеству. Множество неопределённостей объекта обычно делят на параметрическую, структурную, аддитивную ( $\Delta_A, \Delta_A$ ), мультипликативную ( $\Delta_M, \Delta_M$ ) и частотную [2–3].

**Цель работы.** Изучение влияния изменения параметров электромеханического объекта на его динамические свойства, структуру и параметры регуляторов тока и скорости.

**Методы исследования.** Метод математического моделирования (Control System Toolbox, Robust Control Toolbox MATLAB), критерии модульного и симметричного оптимума [6, 7].

**Результаты исследования и их обсуждение.** Анализ параметрической неопределённости объекта управления. В данной работе проведен анализ параметрической неопределённости электромеханического объекта (система тиристорный преобразователь напряжения – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, ТП-Д) и рассмотрено его влияние на структуру и параметры робастного и адаптивного регуляторов.

Динамические характеристики преобразователя определяются его конструктивными особенностями и характеризуются следующими параметрами: коэффициент передачи  $K_t$  и постоянная времени  $T_t$ . При линейном опорном напряжении коэффициент передачи  $K_t$  не является величиной постоянной и зависит от величины управляющего напряжения, при синусоидальном опорном напряжении этот параметр

постоянный. Постоянная времени  $T_t$  также может изменяться от 0,005 до 0,01 с. Динамические и статические характеристики двигателя также определяются его конструктивными особенностями и условиями эксплуатации, от которых зависят коэффициент передачи  $K_d$ , коэффициент внутренней обратной связи по ЭДС  $k_F$ , электромагнитная  $T_\alpha$  и электромеханическая  $T_m$ , постоянные времени двигателя. В процессе работы изменяется магнитный поток машины  $\Phi$ , и вследствие нелинейности кривой намагничивания изменяется индуктивность обмоток  $L$ . Изменение магнитного потока  $\Phi$  вызывает также и изменение коэффициента внутренней обратной связи по ЭДС  $k_F$ , где  $k$  – конструктивная постоянная двигателя. Сопротивление якорной цепи  $R$  также зависит от конструктивных особенностей двигателя, температуры окружающей среды и режимов работы.

Электромеханическая постоянная определяется суммарным моментом инерции  $J$ , который складывается из момента инерции электродвигателя  $J_{дв}$  (величина постоянная) и момента инерции рабочего механизма, приведённого к валу двигателя  $J_{пр} = var$ . Для подъёмно-транспортных механизмов  $J_{пр}$  пропорционален моменту нагрузки  $M_c$ . Для моталок и разматывателей  $J_{пр}$  зависит от угла поворота вала двигателя и монотонно изменяется во время работы. Для насосов и компрессоров  $J_{пр}$  циклически меняется за один оборот рабочего механизма. В электроприводах роботов и манипуляторов  $J_{пр}$  зависит и от величины полезного груза, и от взаимного расположения звеньев механизма. Величина  $J_{пр}$  для ЭП прокатных станков возрастает практически скачком при захвате металла валками. Аналогичная картина и с моментом нагрузки [4].

Все эти неопределённости можно рассматривать как интервальные, и следовательно, передаточная функция объекта управления есть отношение двух интервальных полиномов [5].

**Постановка задачи.** Задан электромеханический объект (рис. 1) с интервальной неопределённостью:

- номинальное сопротивление цепи якоря  $R = 0,167$  Ом изменяется в диапазоне от 0,136 до 0,179 Ом;

- номинальная индуктивность цепи якоря  $L = 0,0029$  Гн изменяется в диапазоне от  $0,0018$  до  $0,0030$ ;
- номинальное значение коэффициента обратной связи по ЭДС  $k\Phi = 3,4$  и изменяется в диапазоне  $\pm 10\%$ ;
- номинальный момент инерции, приведенный к валу двигателя  $J = 8$  кг·м<sup>2</sup> и изменяется в диапазоне  $\pm 40$ ;

- номинальный коэффициент передачи ТП  $K_t = 44$  и изменяется в диапазоне от  $23$  до  $46$ ;
- номинальная постоянная времени ТП  $T_t = 0,0075$  с и изменяется в диапазоне от  $0,005$  до  $0,01$  с.

Результаты математического моделирования. На рисунке 2 представлено семейство переходных характеристик  $\omega(t)$  при заданных интервальных неопределенностях.

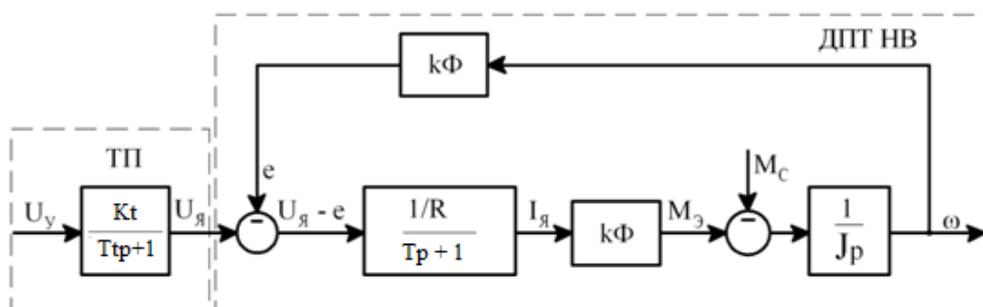


Рис. 1. Структурная схема системы ТП-Д

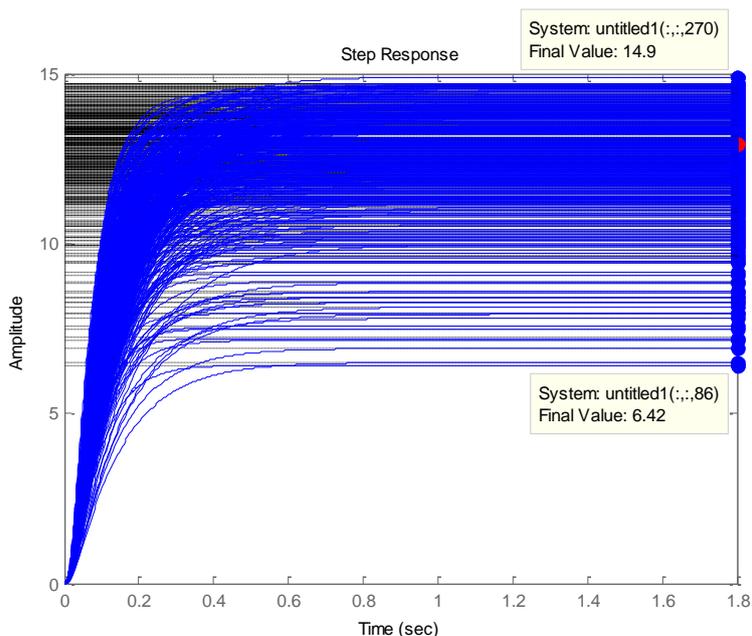


Рис. 2. Переходные характеристики – зависимость угловой скорости ( $c^{-1}$ ) от времени (с) возмущенного объекта

Угловая скорость  $\omega$  изменяется в диапазоне от  $6,42$  до  $14,9$   $c^{-1}$  при номинальной  $13,0$   $c^{-1}$ . Объект управления робастно устойчив и наиболее чувствителен к изменению параметров ТП. Все переходные процессы монотонные.

Рассмотрим свойства замкнутой системы управления (рис. 3) с заданной интервальной неопределенностью.

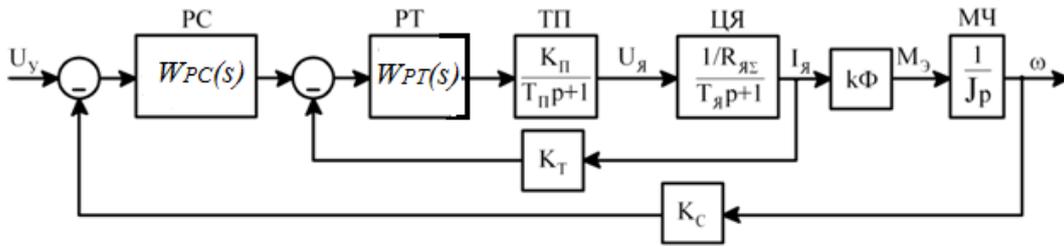


Рис. 3. Двухконтурная система ТТ-Д

Критерий МО-МО. На рисунках 4, 5 представлены переходные процессы в контуре тока  $i(t)$  и контуре скорости  $\omega(t)$  для случая, когда параметры ПИ-регулятора тока и П-регулятора скорости выбраны по критерию МО и номинальным параметрам объекта для наиболее характерных режимов работы, определённых с помощью функции  $[PeakGain, Uwc]=wsgain(W)$ . Перерегулирование по току не превышает 17 %, время регулирования изменяется от 0,031 до 0,087 с. Аналогичный результат и с номинальным регулятором скорости – перерегулирование не превышает 60 %, переходные процессы носят колебательный характер. Таким образом,

выбранные регуляторы не обеспечивают заданные показатели качества.

С помощью функции  $[PeakGain, Uwc]=wsgain(W)$  было найдено наиболее неблагоприятное с точки зрения показателей качества сочетание параметров контура тока и скорости, которое позволило рассчитать параметры ПИ- и П-робастных регуляторов. На рисунках 6 и 7 представлены переходные процессы в контуре тока и контуре скорости с робастными регуляторами. Их применение позволило снизить перерегулирование по току до 4,3 %, по скорости – до 14 %, при этом время переходного процесса по скорости увеличилось до 0,29 с.

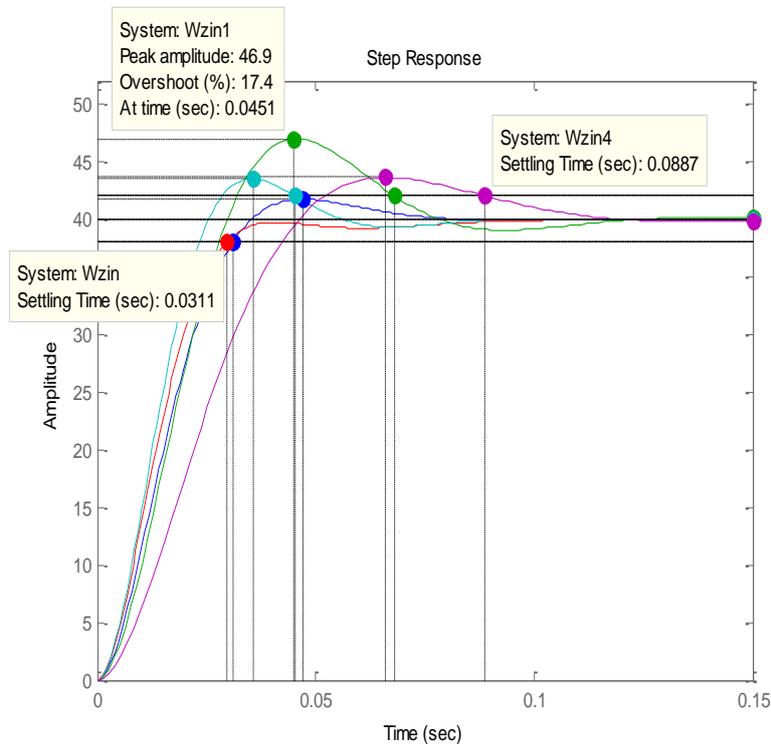


Рис. 4. Переходные процессы в контуре тока – номинальный регулятор

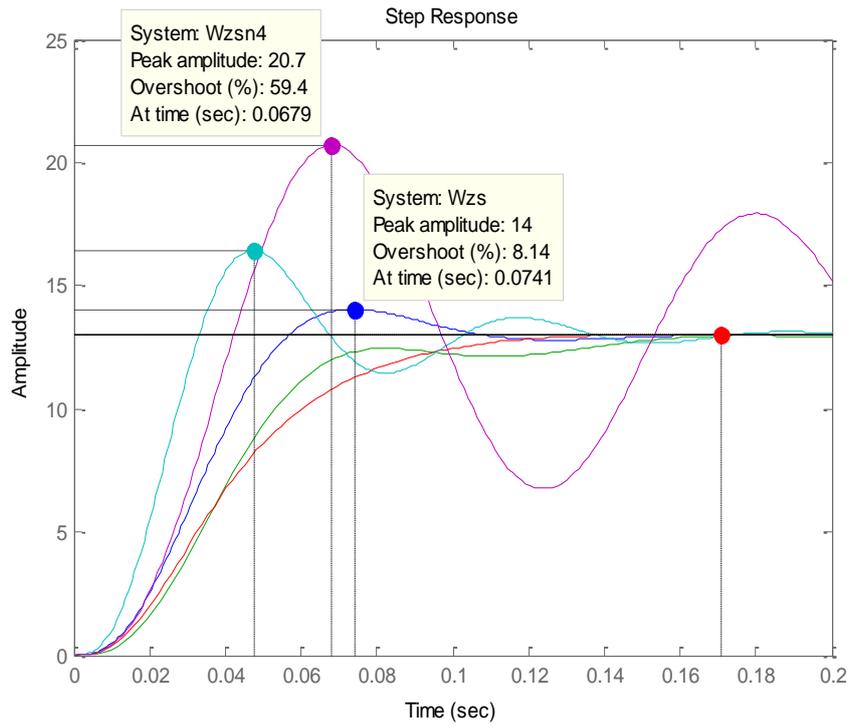


Рис. 5. Переходные процессы в контуре скорости – номинальный регулятор

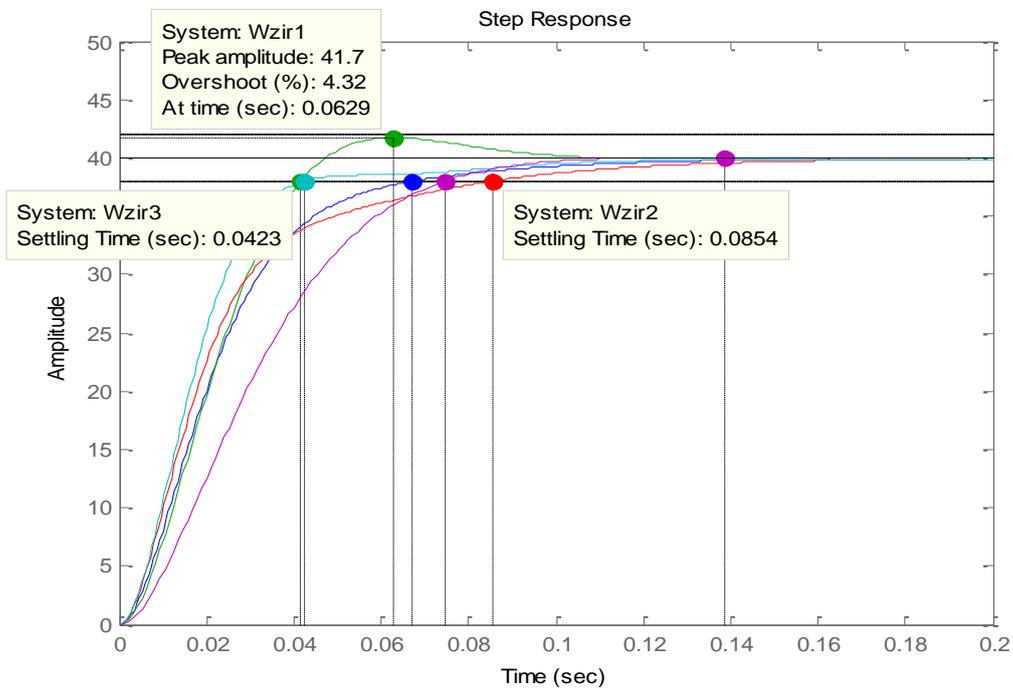


Рис. 6. Робастный регулятор тока, интервальная неопределённость

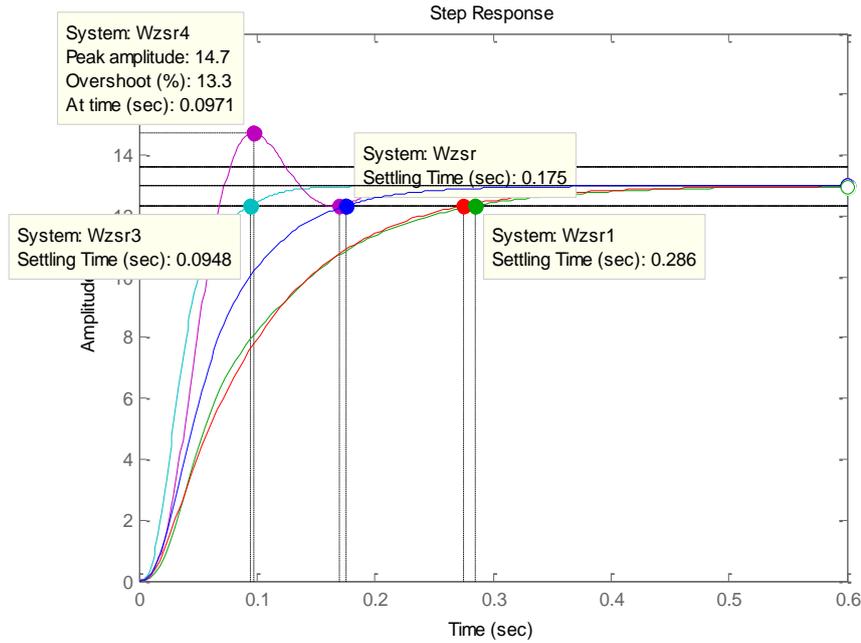


Рис. 7. Робастный регулятор скорости, интервальная неопределенность

Известно, что системы с регуляторами МО-МО являются астатическими по заданию и статическими по нагрузке [7]. Увеличение длительности переходного процесса связано в первую очередь с уменьшением общего передаточного коэффициента, что и обеспечило робастность системы в целом. Очевидно также, что это приводит к большей статической ошибке по скорости. Для ее устранения необходим ПИ-регулятор скорости, однако выбрать его пара-

метры не удалось вследствие их чувствительности к заданной интервальной неопределенности. Поэтому были рассмотрены системы с адаптивными регуляторами (рис. 8):

- П-регулятор скорости и ПИ-регулятор тока, критерий МО-МО;
- ПИ-регулятор скорости и ПИ-регулятор тока, критерий СО-МО;
- система с фильтром, ПИ-регулятор скорости и ПИ-регулятор тока, критерий СО-МО.

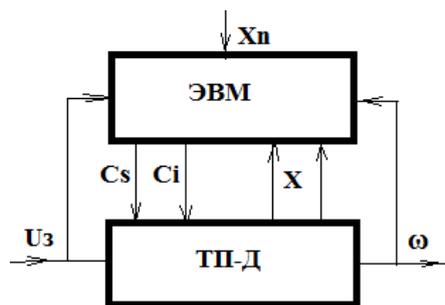


Рис. 8. Система управления с адаптивными регуляторами

В память ЭВМ или микроконтроллера записывается исходная информация  $X_n$ . Это математическая модель системы ТП-Д с интервальной неопределенностью  $R, L, k\Phi, J, K_t, T_t$ , а также номинальные данные электродвигателя, ти-

ристорного преобразователя и рабочей машины. Информация о текущих значениях переменных  $X$  (напряжение, ток, угловая скорость, температура обмоток) поступает в ЭВМ с соответствующих датчиков. На основании этих данных

ЭВМ рассчитывает текущие значения магнитного потока  $\Phi$  и суммарного момента инерции  $J$ , а также корректирующие сигналы  $C_i$  и  $C_s$ .

Последние изменяют параметры регуляторов по критериям МО-МО или СО-МО. На ри-

сунках 9–12 приведены кривые переходных процессов, иллюстрирующие работу таких регуляторов.

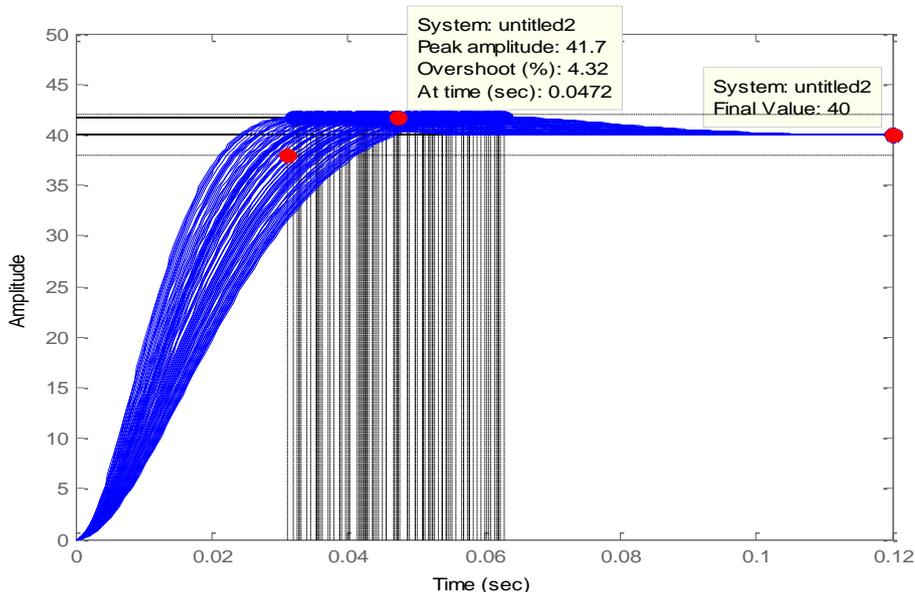


Рис. 9. Переходные процессы в контуре тока с адаптивным ПИ-регулятором  $t_{min}=0,0215$ ;  $t_{max}=0,0413$ ;  $t_{nom}=0,0311$   $\sigma=4,3$  %

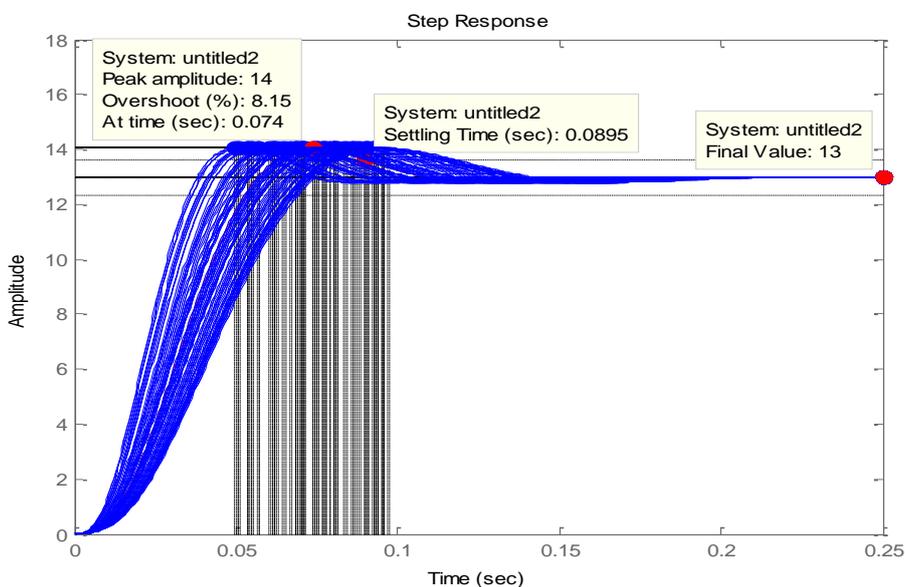


Рис. 10. Переходные процессы в контуре скорости с адаптивным П-регулятором  $t_{min}=0,0353$ ;  $t_{max}=0,118$ ;  $t_{nom}=0,0895$   $\sigma=8,15$  %

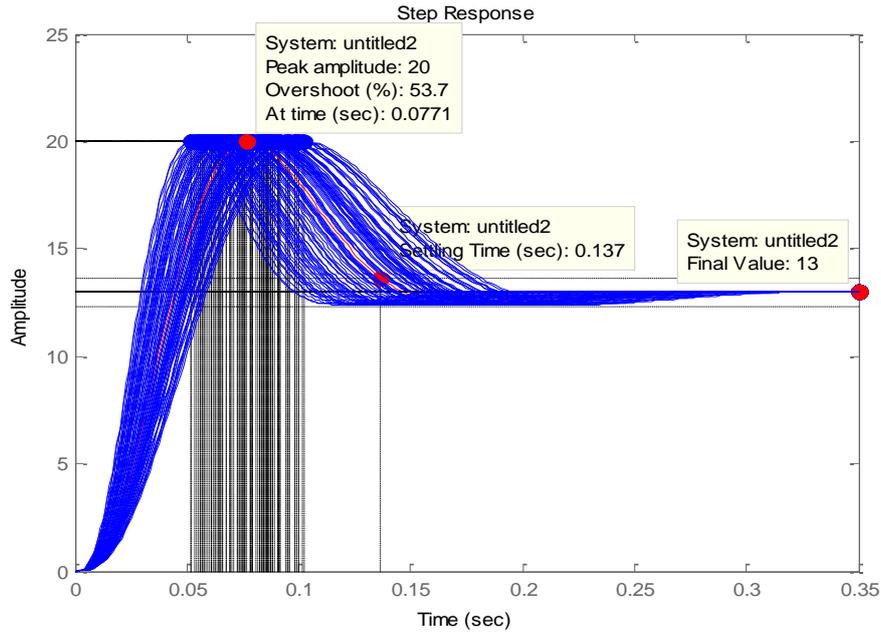


Рис. 11. Переходные процессы в контуре скорости с адаптивным ПИ-регулятором  $t_{min}=0,0931$ ;  $t_{max}=0,178$ ;  $\sigma=53,7\%$

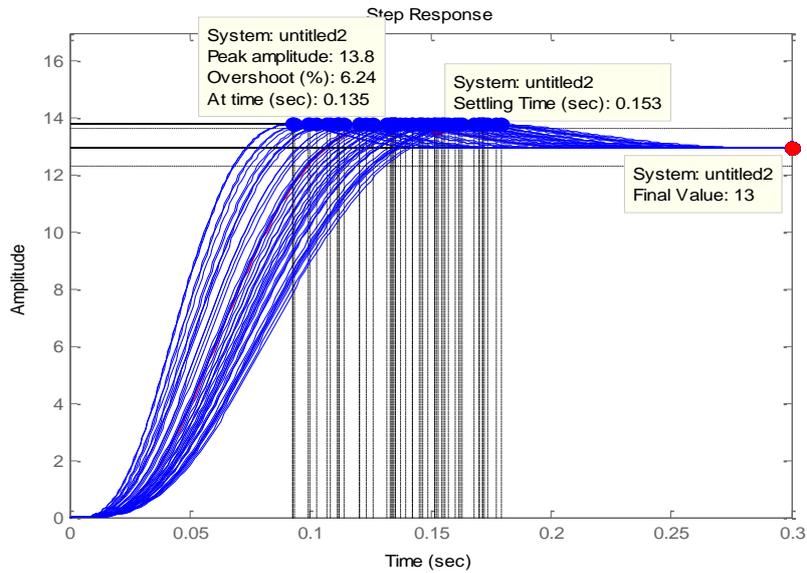


Рис. 12. Переходные процессы в контуре скорости с адаптивным ПИ-регулятором и фильтром  $t_{min}=0,103$ ;  $t_{max}=0,203$ ;  $\sigma=6,24\%$

Очевидно, что адаптивные системы обеспечивают заданные показатели качества по критериям МО и СО во всем диапазоне интервальной неопределенности.

Результаты моделирования представлены в таблице.

## Результаты моделирования

Показатель качества	$t_{\min}$ , с	$t_{\max}$ , с	$t_n$ , с	$\sigma_{\max}$ , %	$\sigma_n$ , %
ПИ-регулятор тока номинальный	0,031	0,1	0,031	17,0	4,3
П-регулятор скорости номинальный	0,06	-	0,067	60	8,2
ПИ-регулятор тока робастный	0,031	0,1	0,09	4,3	4,3
П-регулятор скорости робастный	0,08	0,29	0,23	14,0	8,2
ПИ-регулятор тока адаптивный	0,022	0,041	0,031	4,3	4,3
П-регулятор скорости адаптивный	0,035	0,12	-	8,2	8,2
ПИ-регулятор скорости адаптивный	0,093	0,18	-	53,7	53,7
Система с фильтром на входе	0,1	0,2	-	6,2	6,2

## Выводы

1. Робастные регуляторы тока и скорости (критерий МО-МО), выбранные предложенным методом, обеспечивают робастные показатели качества в заданной интервальной неопределенности параметров объекта управления. Система астатическая по заданию и статическая по нагрузке. Робастность достигается за счет снижения быстродействия и увеличения статической ошибки по скорости в сравнении с номинальным режимом работы.

2. Для снижения статической ошибки рекомендуется переходить к системе с адаптивными регуляторами тока и скорости. Они обеспечивают в заданном интервальном диапазоне показатели качества, соответствующие критериям МО-МО и СО-МО.

## Литература

1. *Цыкунов А.М.* Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 268 с.
2. *Поляк Б.Т., Щербakov П.С.* Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
3. *Веремей Е.И.* Линейные системы с обратной связью: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2013. – 448 с.
4. *Омельченко Е.Я.* Характеристики двигателей в электроприводе: учеб. пособие. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. – 120 с.
5. *Кибардин В.В., Буралков А.А., Тарлецкий А.С.* Робастное управление двигателем постоянного тока // Проблемы автоматизиро-

ванного электропривода. Теория и практика. Вестник Национального Технического Университета <<ХПИ>>. – 2008. – С. 141.

6. *Robust Control Toolbox User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.* Руководство пользователя пакета Robust Control Toolbox.
7. *Ключев В.И.* Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.

## Literatura

1. *Cygunov A.M.* Adaptivnoe i robastnoe upravlenie dinamičeskimi ob'ektami po vyhodu. – М.: FIZMATLIT, 2009. – 268 s.
2. *Poljak B.T., Shherbakov P.S.* Robastnaja ustojčivost' i upravlenie. – М.: Nauka, 2002. – 303 s.
3. *Veremey E.I.* Linejnye sistemy s obratnoj svjaz'ju: učeб. posobie. – SPb.: Lan', 2013. – 448 s.
4. *Omel'chenko E.Ja.* Harakteristiki dvigatelej v jelektroprivode: učeб. posobie. – Magnitogorsk: Izd-vo MGTU, 2004. – 120 s.
5. *Kibardin V.V., Buralkov A.A., Tarleckij A.S.* Robastnoe upravlenie dvigatелем postojanogo toka // Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda. Teorija i praktika. Vestnik Nacional'nogo Tehničeskogo Universiteta <<HPI>>. – 2008. – S. 141.
6. *Robust Control Toolbox User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.* Rukovodstvo pol'zovatelja paketa Robust Control Toolbox.
7. *Ključev V.I.* Teorija jelektroprivoda. – М.: Jenergoatomizdat, 1998. – 704 s.