

## Обоснование фиксированной настройки системы позиционирования для электромехатронного модуля<sup>1</sup>

С.К. Лебедев, А.Р. Колганов, Н.Е. Гнездов  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klgn@drive.ispu.ru, gnezdov@drive.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Использование электромехатронных модулей во многих случаях внедрения характеризуется тем, что параметры механики либо изменяются, либо определить их затруднительно. Основным тренд в решении этой проблемы – использование дополнительных контуров идентификации и адаптации. Возможен вариант в использовании регуляторов со сложной алгоритмической конструкцией на основе нейронных сетей, нечеткой логики и генетических алгоритмов. Такие решения не всегда подходят для случаев, где требуется высокое быстродействие и конкурентоспособная цена. Системы позиционирования электромехатронных модулей, настроенные на динамику Бесселя, обладают простыми по структуре регуляторами положения. В этой связи теоретическое и практическое обоснование фиксированной настройки регуляторов на определенное значение приведенной инерции механики представляется актуальным и составляет предмет настоящего исследования.

**Материалы и методы:** Анализ характеристик статических и астатических систем позиционирования выполнен на основе методов современной теории автоматического управления с учетом требований, обусловленных областью практической реализации электромехатронной системы. Характеристики систем позиционирования получены с помощью средств символьной математики *MathCAD* и моделирования в среде *Simulink (Matlab)* с использованием инструментов *Linear Analysis*.

**Результаты:** На основе методов классического анализа систем управления и возможностей компьютерной математики обоснованы возможность и эффективность фиксированной настройки статических и астатических регуляторов систем позиционирования электромехатронных модулей с жесткой механикой при изменении параметров инерции механики в широких пределах.

**Выводы:** Рекомендации о фиксированной настройке статических и астатических регуляторов положения на максимальное значение приведенной инерции механики получили теоретическое обоснование. Системы позиционирования электромехатронных модулей с такой настройкой демонстрируют стабильность характеристик.

**Ключевые слова:** системы управления, электропривод, регуляторы положения, характеристический полином, фиксированная настройка, система позиционирования.

## Justification of positioning system fixed setting for electromechatronic modules

S.K. Lebedev, A.R. Kolganov, N.E. Gnezdov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: lebedev@drive.ispu.ru, klgn@drive.ispu.ru, gnezdov@drive.ispu.ru

### Abstract

**Background:** The use of electromechatronic modules in many cases changes mechanical parameters or makes their determination difficult. The main direction in solving this problem is the use of additional circuits of identification and adaptation. An alternative variant is using regulators of a complicated algorithmic structure based on neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms. Such solutions are not always suitable when a fast response and a competitive price are required. Positioning systems of electromechatronic modules adjusted to Bessel's dynamics have structurally simple position regulators. Therefore, it is quite urgent to theoretically and practically justify fixed settings of regulators at a certain level of reduced mechanical inertia, which is the object of this study.

**Materials and methods:** Parameters of static and astatic positioning systems have been analyzed by the methods of modern automatic control theory in accordance with the requirements of the area of practical implementation of electromechatronic systems. The positioning system parameters were obtained by symbol mathematics tools *MathCAD* and simulation in the *Simulink (Matlab)* environment by using *Linear Analysis* instruments.

**Results:** By employing methods of classical analysis of control systems and computer mathematics potential, the authors have proved that it is possible and efficient to use fixed setting of static and astatic regulators of positioning systems of rigid mechanics electromechatronic modules if mechanical inertia parameters vary within a wide range of values.

**Conclusions:** The authors have theoretically justified the recommendations to fix the static and astatic position regulators at the maximum level of reduced mechanical inertia. The positioning systems of electromechatronic modules with such settings have stable parameters.

**Key words:** control systems, electric drive, position regulators, characteristic polynomial, fixed setting, positioning system.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2017.1.040-046

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00972).

**Введение.** Электромехатронные модули (ЭММ), построенные на базе современных электроприводов переменного тока, обеспечивают конкурентоспособные характеристики технологического оборудования. Области применения ЭММ с системами позиционирования – от запорных, дозирующих и регулирующих аппаратов трубопроводных систем в энергетике, нефтегазовой отрасли, ЖКХ до космических и оборонных технологий [1–3].

Наиболее широко ЭММ позиционирования используют в ключевых отраслях промышленности: станкостроении и робототехнике [1, 4, 5]. Во многих случаях применения ЭММ позиционирования параметры механики либо изменяются, либо определить их затруднительно.

Основной тренд в решении этой проблемы – использование дополнительных контуров идентификации и адаптации. Возможны варианты в использовании регуляторов со сложной алгоритмической конструкцией на основе нейронных сетей, нечеткой логики и генетических алгоритмов [6–8]. Такие решения не всегда подходят для случаев, где требуется высокое быстродействие и конкурентоспособная цена.

Системы позиционирования ЭММ, настроенные на динамику Бесселя [9], обладают простыми по структуре регуляторами положения [10]. В этой связи теоретическое и практическое обоснование фиксированной настройки регуляторов, обеспечивающей робастность ЭММ, представляется актуальной задачей.

**Материалы и методы.** На рис. 1 показана структура системы позиционирования – регулирования положения исполнительного органа ЭММ  $q$  с регулятором положения (РП) и входным фильтром ( $W_f$ ), обеспечивающим компенсацию нулей передаточной функции системы позиционирования. «Механика» ЭММ представлена моделью «жесткой» механики с инерционностью  $k_{in}(q_i)$  и моментом нагрузки  $Q_L(q_i, \dot{q}_i)$ , которые в случаях многоосевой

реализации ЭММ (роботы, станки и пр.) зависят от положения и скоростей элементов механики. Инерционность оптимизированного контура момента  $Q$  системы векторного управления электроприводом представлена эквивалентным инерционным звеном (КМ) [2, 3].

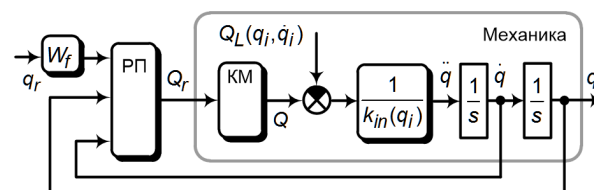


Рис. 1. Система позиционирования электромехатронного модуля

Рассмотрим наиболее эффективные в своем классе по астатизму РП [10]: модифицированные ПД – П(Д), ПИД – ПИ(Д), ПИД с двойным интегрированием – ПИ2И(Д).

В табл. 1 приведены результаты синтеза систем позиционирования ЭММ с настройкой РП на динамику, соответствующую полиномам Бесселя.

Расчет параметров регуляторов и входных фильтров выполнен методом стандартных коэффициентов [7, 10] с пренебрежением инерционностью контура момента электромехатронного модуля в силу малости его постоянной времени в современных модулях.

Характеристические полиномы (табл. 1) получены в виде, удобном для анализа динамики при вариации параметра механики ЭММ –  $k_{in}$ , отличного от того значения, на которое настроены регуляторы, –  $k_{inr}$  (фиксированное значение).

Требуемая полоса пропускания системы позиционирования –  $\omega_{np} = 62,8$  рад/с. Фиксированное значение инерционного коэффициента –  $k_{inr} = 1,0$  кг·м<sup>2</sup>. При компьютерном моделировании (*Simulink Matlab*) КМ представляем инерционным звеном 1-го порядка с постоянной времени  $T_{км} = 0,001$  с.

Таблица 1. Параметры систем позиционирования ЭММ и характеристические полиномы

РП	$\omega_0$	Параметры	$W_f(s)$	Характеристический полином системы
П(Д)	$\omega_{np}$	$k_p = 1,619\omega_0^2 k_{inr}$ $k_d = 2,203\omega_0 k_{inr}$	1	$s^2 + 2,2032 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np} s + 1,6185 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np}^2$
ПИ(Д)	$\frac{\omega_{np}}{0,9}$	$k_p = 4,867\omega_0^2 k_{inr}$ $k_i = 2,711\omega_0^3 k_{inr}$ $k_d = 3,417\omega_0 k_{inr}$	$\frac{1}{1,795 s + 1}$ $\frac{1}{\omega_0}$	$s^3 + 3,797 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np} s^2 + 6,008 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np}^2 s + 3,7188 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np}^3$
ПИ2И(Д)	$\frac{\omega_{np}}{0,74}$	$k_p = 10,07\omega_0^2 k_{inr}$ $k_d = 4,730\omega_0 k_{inr}$ $k_{j1} = 11,11\omega_0^3 k_{inr}$ $k_{j2} = 5,258\omega_0^4 k_{inr}$	$\frac{1}{1,915 s^2 + \frac{2,113}{\omega_0} s + 1}$	$s^4 + 6,3924 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np} s^3 + 18,388 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np}^2 s^2 + 27,417 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np}^3 s + 17,533 \frac{k_{inr}}{k_{in}} \omega_{np}^4$

**Результаты.** На рис. 2 показаны результаты компьютерных экспериментов ЭММ со статическим П(Д)-регулятором при фиксированной настройке регулятора на максимум ( $k_{inr}$ ). При 10-кратном снижении  $k_{inr}$  механики наблюдаем монотонность процесса позиционирования при сохранении быстродействия.

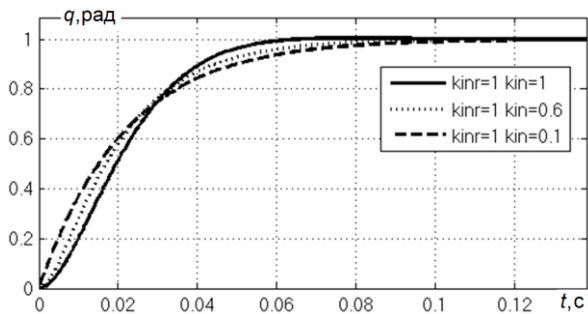


Рис. 2. Процесс позиционирования системы с П(Д)-регулятором при настройке на максимум

Рис. 3 демонстрирует ухудшение динамики (рост перерегулирования и колебательности) при фиксированной настройке регулятора на минимум и 10-кратном росте  $k_{in}$  объекта.

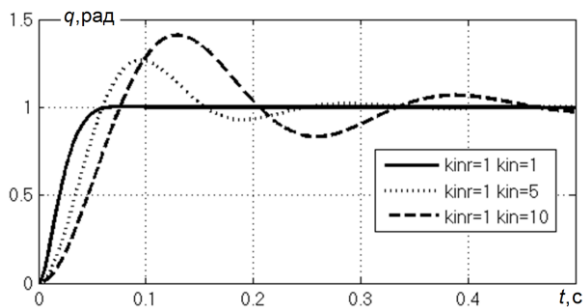


Рис. 3. Процесс позиционирования системы с П(Д)-регулятором при настройке на минимум

В табл. 2 сведены результаты анализа частотных характеристик ЭММ позиционирования с П(Д)-регулятором при вариации  $k_{in}$  объекта.

Таблица 2. Параметры логарифмических частотных характеристик системы с П(Д)-регулятором

Параметры	$k_{in}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$		
	0,1	1,0	10
$\omega_{-3 \text{ дБ}}, \text{ рад/с}$	45,7	64,3	15,4
$\omega_{-90^\circ}, \text{ рад/с}$	798	79,7	25,2
$L(1), \text{ дБ}$	-76	-76	-76
$L(\omega_{\text{пр}}), \text{ дБ}$	-80,7	-79	-90,4

С точки зрения обеспечения полосы пропускания контролируем частоты при пересечении ЛАЧХ уровня  $-3 \text{ дБ}$  ( $\omega_{-3 \text{ дБ}}$ ) и ЛФЧХ уровня  $-90^\circ$  ( $\omega_{-90^\circ}$ ), а также параметры ЛАЧХ по возмущению: уровень ЛАЧХ на низких частотах  $L(1)$  и на границе полосы пропускания  $L(\omega_{\text{пр}})$ . Результаты говорят о том, что при на-

стройке на максимум в широком диапазоне вариации  $k_{in}$  обеспечивается полоса пропускания и снижение влияния нагрузки на позиционирование.

В пользу использования фиксированной настройки на максимум говорят и результаты анализа характеристик времени группового запаздывания (рис. 4). Снижение  $k_{in}$  приводит к незначительному снижению диапазона постоянства, тогда как повышению  $k_{in}$  ведет к потере свойств динамики Бесселя.

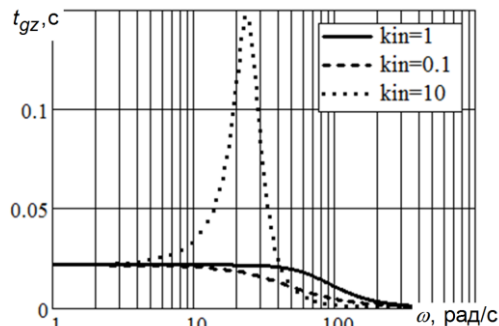


Рис. 4. Характеристики времени группового запаздывания системы с П(Д)-регулятором

Так как ЭММ с П(Д)-регулятором является инерционным объектом 2-го порядка, его динамику можно описать типовым динамическим звеном с характеристическим полиномом

$$s^2 + 2 \frac{\xi}{T} s + \frac{1}{T^2}, \quad (1)$$

где  $T$  – эквивалентная постоянная времени;  $\xi$  – эквивалентный коэффициент затухания.

Сопоставляя (1) и полином для П(Д)-регулятора из табл. 1, получим выражения для эквивалентных параметров системы позиционирования с П(Д)-регулятором:

$$T = \frac{0,786}{\omega_{\text{пр}}} \sqrt{\frac{k_{in}}{k_{inr}}}; \quad (2)$$

$$\xi = 0,866 \sqrt{\frac{k_{inr}}{k_{in}}}. \quad (3)$$

Полученные по выражениям (2), (3) зависимости (рис. 5, 6) показывают рост коэффициента затухания и снижение постоянной времени при 10-кратном снижении  $k_{in}$ .

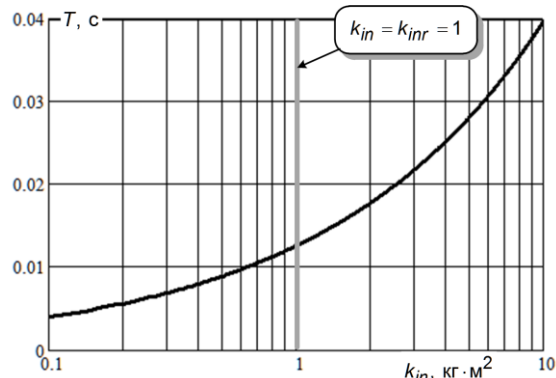


Рис. 5. Изменение эквивалентной постоянной времени системы с П(Д)-регулятором

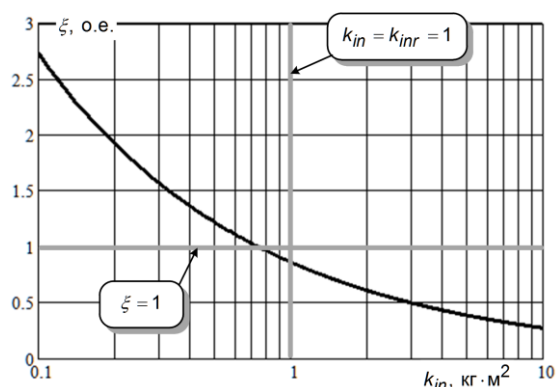


Рис. 6. Изменение эквивалентного коэффициента затухания системы с П(Д)-регулятором

И, не забывая о том, что «кашу маслом не испортить», посмотрим, как ведут себя корни характеристического полинома (см. табл.1) при изменении  $k_{in}$ . При снижении  $k_{in}$  объекта от 1 до 0,7 видим (рис. 7) превращение комплексно сопряженных корней в действительные.

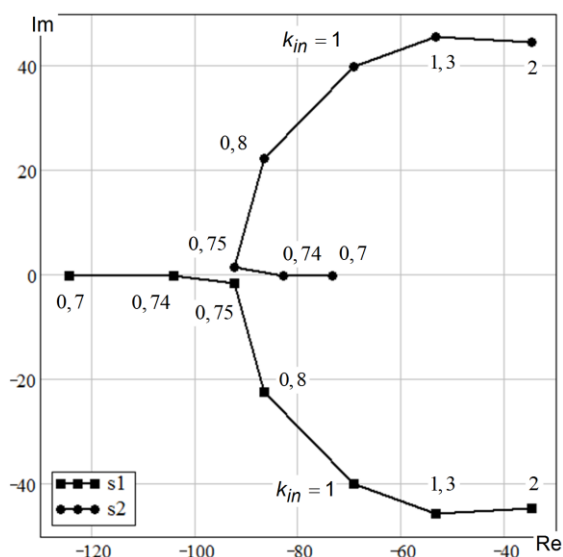


Рис. 7. Годографы корней характеристического полинома системы с П(Д)-регулятором

Астатические системы позиционирования ЭММ реагируют на фиксированную настройку аналогично, с единственным отличием – при настройке на минимум возможно возникновение неустойчивости систем: ПИ(Д)-регулятор (рис. 8–11, табл. 3); ПИ2И(Д)-регулятор (рис. 12–15, табл. 4).

Анализ характеристических полиномов (см. табл. 1) дает предельные по устойчивости значения инерционных коэффициентов модуля при фиксированной настройке:

$$\text{ПИ(Д)} - k_{in} < 6,13 k_{inr}; \quad (4)$$

$$\text{ПИ2И(Д)} - k_{in} < 3,33 k_{inr}. \quad (5)$$

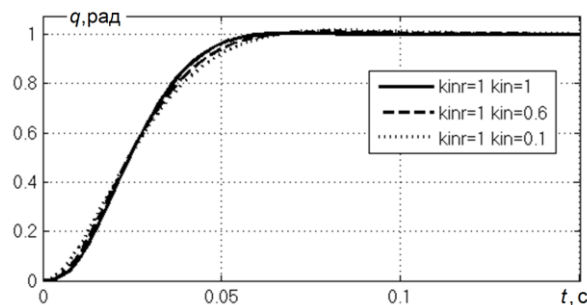


Рис. 8. Процесс позиционирования системы с ПИ(Д)-регулятором при настройке на максимум

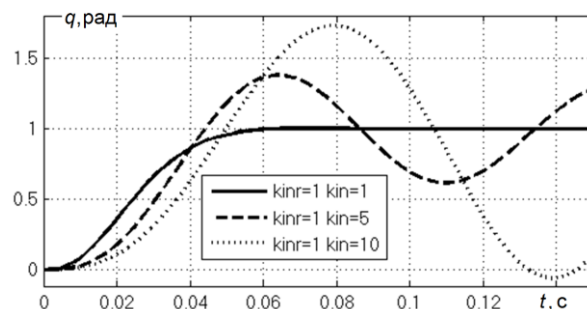


Рис. 9. Процесс позиционирования системы с ПИ(Д)-регулятором при настройке на минимум

Таблица 3. Параметры логарифмических частотных характеристик системы с ПИ(Д)-регулятором

Параметры	$k_{in}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$		
	0,1	1,0	5,5
$\omega_{-3 \text{ дБ}}, \text{ рад/с}$	55,1	67,5	48,2
$\omega_{-90^\circ}, \text{ рад/с}$	62,2	62,6	65
$L(1), \text{ дБ}$	-119	-119	-119
$L(\omega_{\text{пр}}), \text{ дБ}$	-87,3	-85,9	-66,7

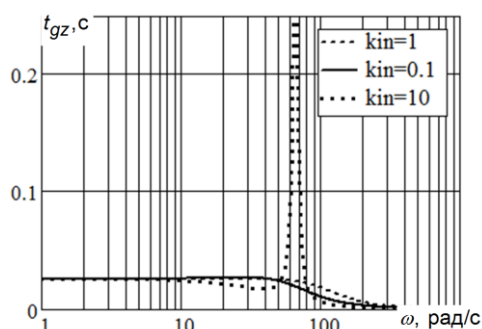


Рис. 10. Характеристики времени группового запаздывания системы с ПИ(Д)-регулятором

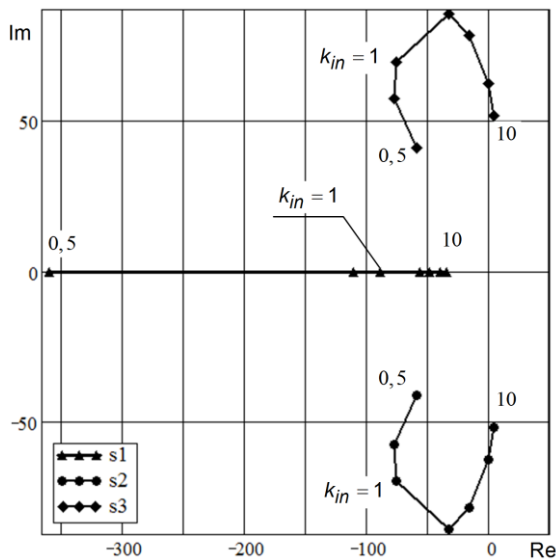


Рис. 11. Годографы корней характеристического полинома системы с ПИ(Д)-регулятором

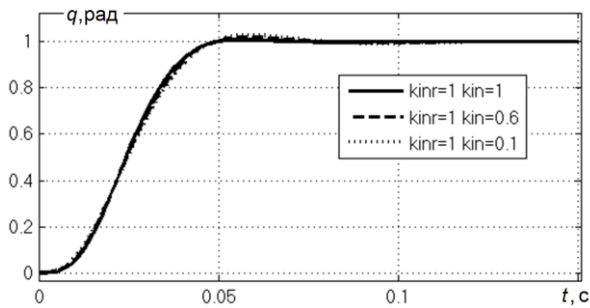


Рис. 12. Процесс позиционирования системы с ПИИ(Д)-регулятором при настройке на максимум

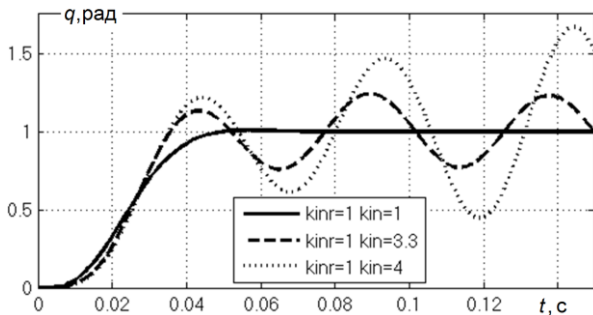


Рис. 13. Процесс позиционирования системы с ПИИ(Д)-регулятором при настройке на минимум

Таблица 4. Параметры частотных характеристик по управлению системы с ПИИ(Д)-регулятором

Параметры	$k_{in}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$		
	0,1	1,0	2,5
$\omega_{-3 \text{ дБ}}, \text{ рад/с}$	78,2	82,7	151
$\omega_{-90^\circ}, \text{ рад/с}$	60,9	62,6	66,5
$L(1), \text{ дБ}$	-169	-169	-169
$L(\omega_{\text{пр}}), \text{ дБ}$	-98,5	-98,5	-98,5

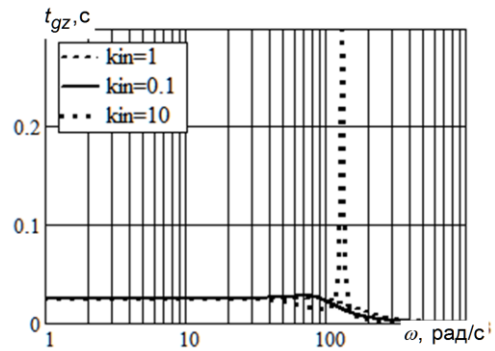


Рис. 14. Характеристики времени группового запаздывания системы с ПИИ(Д)-регулятором

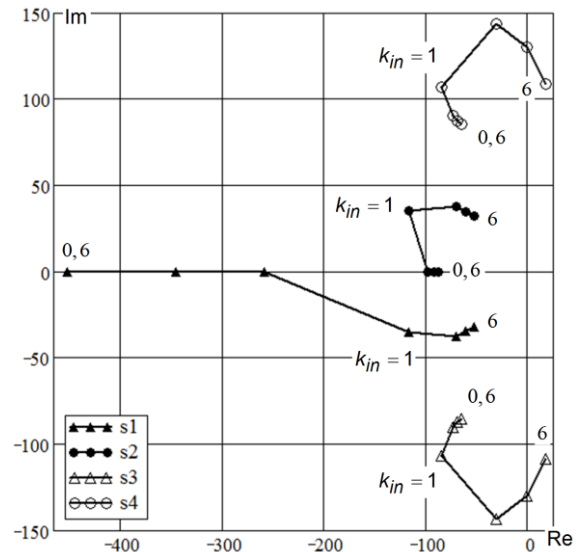


Рис. 15. Годографы корней характеристического полинома системы с ПИИ(Д)-регулятором

Годографы корней характеристических уравнений астатических систем позиционирования ЭММ (рис. 11, 15) подтверждают пересечение границы устойчивости при значениях  $k_{in}$ , определяемых выражениями (4), (5).

**Выводы.** Выполненный анализ структур ЭММ позиционирования с РП позволяет дать следующие рекомендации по их применению в станкостроении и робототехнике:

- использование для ЭММ П(Д), ПИ(Д) и ПИИ(Д)-регуляторов обеспечивает характеристики по управлению и возмущению в заданной полосе пропускания, соответствующие типу регулятора (статический, астатический 1-го или 2-го порядка). Выбор порядка астатизма следует делать исходя из технических требований к ЭММ;

- применение в регуляторах динамики Бесселя обеспечивает максимальное быстродействие, минимальные перерегулирование и искажение сигнала управления в заданной для ЭММ полосе пропускания по управлению;

- фиксированная настройка регулятора на максимум коэффициента инерционности обеспечивает робастность ЭММ позиционирования к вариации инерционности объекта.

Предварительная оценка позволяет говорить о реализуемости алгоритмов управления ЭММ позиционирования с робастными свойствами в микроконтроллерах класса *motor control*, в том числе российской разработки.

#### Список литературы

1. Терехов В.М., Осипов А.И. Системы управления электроприводов. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 304 с.
2. Глазунов В.Ф., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Многосвязные электромехатронные системы с нежесткой механикой / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 224 с.
3. Колганов С.К., Лебедев С.К. Современные методы управления в электромехатронных системах. Разработка, реализация, применение. – Иваново, 2012. – 256 с.
4. Булгаков А.Г., Воробьев В.А. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. – М.: СОЛН-ПРЕСС, 2007. – 488 с.
5. Лебедев С.К. Электромеханические системы позиционирования: Расчет кинематики и динамики манипуляторов промышленных роботов: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2003. – 120 с.
6. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Аполонский В.В. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 2. – С. 21–26.
7. Ишматов З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами, полиномиальные методы. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 278 с.
8. Тарарыкин С.В. Структурно-параметрический синтез инвариантно-робастных систем управления: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2014. – 120 с.
9. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
10. Лебедев С.К., Колганов А.Р. Регуляторы положения систем позиционирования с динамикой Бесселя для электромехатронных модулей // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 6. – С. 41–47.

*Лебедев Сергей Константинович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон (4932) 26-97-09,  
e-mail: lebedev@drive.ispu.ru

*Lebedev Sergei Konstantinovich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations,  
tel. (4932) 26-97-09,  
e-mail: lebedev@drive.ispu.ru

*Колганов Алексей Руфимович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон (4932) 26-97-09,  
e-mail: klgn@drive.ispu.ru

*Kolganov Aleksei Rufimovich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations,  
tel. (4932) 26-97-09,  
e-mail: klgn@drive.ispu.ru

#### References

1. Terekhov, V.M., Osipov, A.I. *Sistemy upravleniya elektropriwodov* [Electric drive control systems]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. 304 p.
2. Glazunov, V.F., Lebedev, S.K., Gnezdov, N.E. *Mnogosvyaznye elektromekhanotronnye sistemy s nezhestkoy mekhanikoy* [Multi-variable electromechatronic systems with nonrigid mechanics]. Ivanovo, 2013. 224 p.
3. Kolganov, S.K., Lebedev, S.K. *Sovremennyye metody upravleniya v elektromekhanotronnykh sistemakh. Razrabotka, realizatsiya, primeneniye* [Modern control methods in electro-mechanical systems. Design, realization, application]. Ivanovo, 2012. 256 p.
4. Bulgakov, A.G., Vorobyov, V.A. *Promyshlennyye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol' i upravleniye* [Industrial robots. Kinematics, dynamics, monitoring and control]. Moscow, SOLN-PRESS, 2007. 488 p.
5. Lebedev, S.K. *Elektromekhanicheskie sistemy pozitsionirovaniya: Raschet kinematiki i dinamiki manipulyatorov promyshlennykh robotov* [Electromechanical positioning systems: calculation of kinematics and dynamics of manipulators of industrial robots]. Ivanovo, 2003. 120 p.
6. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V., Apolonsky, V.V. *Parametricheskaya optimizatsiya elektromekhanicheskikh sistem s regulyatorami i nablyudatelyami sostoyaniya* [Parametric optimisation of electromechanical systems with regulators and state observers]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 2, pp. 21–26.
7. Ishmatov, Z.Sh. *Mikroprotsessornoye upravleniye elektropriwodami i tekhnologicheskimi ob'ektami, polinomial'nyye metody* [Microprocessor control of electric drives and technological installations, polynomial methods]. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2008. 278 p.
8. Tararykin, S.V. *Strukturno-parametricheskyy sintez invariantno-robastnykh sistem upravleniya* [Structural and parametrical synthesis of robust invariant control systems]. Ivanovo, 2014. 120 p.
9. Moshits, G., Khorn, P. *Proektirovaniye aktivnykh fil'trov* [Active filter design]. Moscow, Mir, 1984. 320 p.
10. Lebedev, S.K., Kolganov, A.R. *Regulyatory polozheniya sistem pozitsionirovaniya s dinamikoy Besselya dlya elektromekhanotronnykh moduley* [Position regulators of positioning systems with Bessel's dynamics for electromechatronic modules]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 6, pp. 41–47.

*Гнездов Николай Евгеньевич*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон (4932) 26-97-09,  
e-mail: gnezdov@drive.ispu.ru

*Gnezdov Nikolai Yevgenyevich*,  
Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations,  
tel. (4932) 26-97-09,  
e-mail: gnezdov@drive.ispu.ru