

**В.В. Тютиков, Е.М. Шляцкая**

### **РЕДУКЦИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПРИ СИНТЕЗЕ САУ**

*Использование современных методов синтеза регуляторов часто наталкивается на трудности их технической реализации, связанные с получением в результате синтеза устройств управления высокой сложности. В частности, синтез регуляторов входа-выхода методом модального управления, основанный на решении полиномиальных уравнений, приводит к необходимости использования префильтров, имеющих сложность соизмеримую со сложностью самого регулятора. Данная статья посвящена разработке подхода, направленного на упрощение таких управляющих устройств без влияния на качественные показатели системы в целом. Для синтеза регуляторов использован метод полиномиальных уравнений, позволяющий обеспечить заданное качество процессов в САУ на основе измерения только выходной координаты объекта управления. Редукция управляющих устройств выполняется на основе метода эквивалентных структурных преобразований, гарантирующего неизменность передаточной функции САУ, а обеспечение астатизма по управляемому воздействию осуществляется с применением метода коэффициентов ошибки. Предложен метод редукции управляющих устройств, основанный на применении метода эквивалентных структурных преобразований, позволяющий существенно снизить сложность управляющего устройства. Отличие данного метода от известных состоит в отсутствии необходимости пересчета коэффициентов управляющего устройства и сохранения качественных показателей САУ. Использование предложенного метода позволяет снизить порядок передаточной функции управляющего устройства в два раза, что существенно уменьшает трудоемкость его практической реализации. Также сокращается время выполнения управляющей программы, что важно при создании современных САУ объектами, обладающими высоким быстродействием и требующими малого времени исполнения управляющих программ. Результаты математического моделирования подтвердили идентичность показателей качества редуцированной и исходной САУ при обработке управляющих и возмущающих воздействий.*

*Полиномиальный регулятор; синтез; эквивалентные структурные преобразования; редукция.*

**V.V. Tyutikov, E.M. Shlyatskaya**

### **REDUCING THE DIMENSION OF CONTROL UNIT IN THE SYNTHESIS OF ACS**

*The implementation of the modern methods for synthesis of regulators often encounters difficulties in its technical realization connecting with receiving of high complex control device in the result of synthesis. The synthesis of input-output regulators, which uses the method of modal control based on solving polynomial equations, particularly leads to necessity of pre-filter implementation. The pre-filters are sophisticated as well as the whole regulator. This article is devoted to the developing of approach, which focuses on reduction of these control devices without an influence on the performance measures of system in general. The synthesis of regulators uses the method of polynomial synthesis, which allows supporting set number of processes in automatic control system in terms of measuring only input point of control object. The reduction of control device is based on the method of equivalent structural transformations, which guaranties the permanence of transfer function of automatic control system. The implementation of the method of error coefficient supports the astatism of control influence. Proposing method of control device reduction is based on implementation of the method of equivalent structural transformations. It allows reducing the complexity of control device essentially. The differences of this method are absence of necessity in recalculating of control device coefficients and remaining the performance measures of automatic control system. The using of proposed method let make the order of transfer function of control device half as much that essentially reduces the complexity of its practical realization. In addition, the execution time of control program decreases. It is important, when the objects, which*

*keep the high processing speed and demand small sampling times of control programs, create an automatic control system. The results of simulation analysis acknowledged the identity of performance measures the both: the reduced system and the initial automatic control system during the processing of control and disturbing actions.*

*Polynomial regulator; synthesis; equivalent structural transformations; reduction.*

**Введение.** Использование современных аналитических методов синтеза регуляторов часто наталкивается на трудности их технической реализации и настройки, связанные с получением в результате синтеза устройств управления высокого порядка [1–5], даже если объект управления не обладает значительной сложностью. В частности, синтез регуляторов входа-выхода методом модального управления, основанный на решении полиномиальных уравнений, приводит к необходимости использования префильтров, имеющих сложность соизмеримую со сложностью самого регулятора. В настоящее время синтез САУ полиномиальным методом широко используется для управления различного рода объектами [6–13]. Он предполагает получение передаточной функции регулятора на основе решения диофантова уравнения (или  $\mathcal{L}$ -уравнения), неизвестными в котором являются полиномы [14–21]. При этом степени полиномов передаточной функции регулятора (ПФР) задаются с целью получения САУ свойств необходимых проектировщику (соответствующих техническому заданию).

В зависимости от того, какие степени полиномов заданы [21], может быть получен ряд регуляторов:

- ◆ дифференцирующие (степень полинома числителя ПФР выше степени полинома знаменателя) и технически реализуемые (степень полинома числителя ПФР не выше степени полинома знаменателя);
- ◆ минимальные (степени полиномов которых минимально возможны для решения уравнения синтеза) и неминимальные (степени полиномов которых выше минимально необходимых для решения уравнения синтеза).

При синтезе дифференцирующих регуляторов нужно, безусловно, иметь в виду, что для их реализации потребуется использование приближенных вычислений производных, например, методом Эйлера [22].

Использование неминимальных регуляторов дает проектировщику свободу в выборе необходимых ему свойств регулятора, например, фильтрующих возможностей (при увеличении степени полинома знаменателя ПФР) или выбора некоторых коэффициентов полиномов регулятора (при увеличении степени полинома числителя ПФР) [21]. В первом случае коэффициенты ПФР определяются однозначно (уравнение синтеза имеет единственное решение), во втором случае ряд коэффициентов при синтезе может быть задан произвольно.

Наиболее часто в исследованиях используют минимальные технически реализуемые регуляторы [6, 9, 10, 13, 20]. Однако и в этом случае основной трудностью технической реализации САУ является сложность управляющего устройства.

**Постановка задачи.** Структура САУ с полиномиальным регулятором может быть различной. На рис. 1,а,б приведены типовые структуры. Здесь  $A(s)$  и  $B(s)$ ,  $C(s)$  и  $R(s)$  – полиномы знаменателя и числителя передаточных функций объекта управления и регулятора соответственно;  $y_0(s)$ ,  $\Delta(s)$ ,  $u(s)$ ,  $y(s)$  – изображения по Лапласу сигналов задающего воздействия, ошибки, управления и выхода.

Для синтеза минимальных технически реализуемых регуляторов оперируют следующими степенями полиномов [17, 20, 21]:

$$\begin{aligned} \deg R(s) &= \deg A(s) - 1, \quad \deg C(s) = \deg R(s), \\ \deg D(s) &= \deg A(s) + \deg C(s). \end{aligned} \quad (1)$$

Диофантово уравнение синтеза регулятора при этом имеет вид:

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s), \tag{2}$$

где  $D(s)$  – характеристический полином САУ, определяющий качество переходных процессов и задаваемый проектировщиком, обычно выбирается из ряда стандартных полиномов: Ньютона, Баттерворта и т.д. Полиномы  $A(s)$ ,  $C(s)$ ,  $D(s)$  нормированы (коэффициенты при старшей степени  $s$  равны единице),

Необходимо иметь в виду, что при использовании регулятора только в контуре главной обратной связи в передаточной функции САУ  $H(s)$  появляются «дополнительные» нули, определяемые корнями полинома  $R(s)$  (рис. 1,а) или  $C(s)$  (рис. 1,б):

$$H(s) = \frac{R(s)B(s)}{A(s)C(s) + B(s)R(s)}, \quad H(s) = \frac{C(s)B(s)}{A(s)C(s) + B(s)R(s)}.$$

Влияние таких нулей может проявляться в появлении значительного перерегулирования в переходных процессах. Для исключения их влияния [13] вводят префильтр вида

$$H_F(s) = \frac{1}{R(s)} \quad \text{или} \quad H_F(s) = \frac{1}{C(s)} \tag{3}$$

соответственно (рис. 1,а,б), что повышает порядок передаточной функции управляющего устройства в два раза. Безусловно, это значительно усложняет его техническую реализацию, требуя выполнения большого количества дополнительных операций.

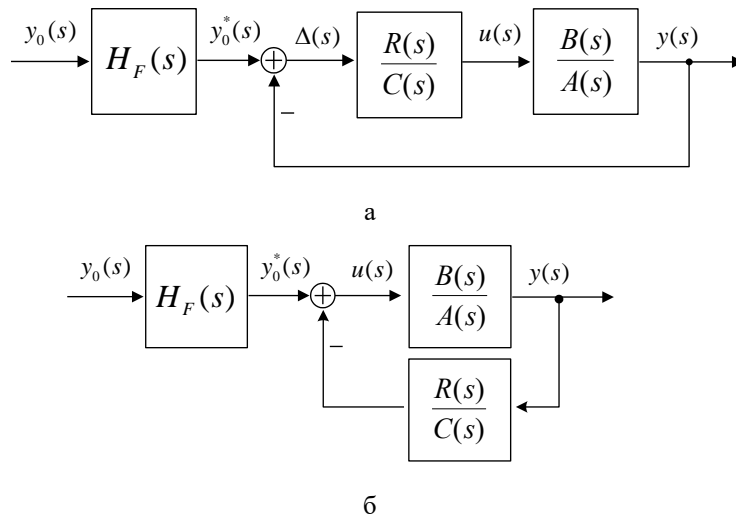


Рис. 1. Типовые структуры САУ

Обеспечение необходимой степени астатизма по возмущающим воздействиям в таких системах осуществляется или введением дополнительных интеграторов в контур главной обратной связи (расширением пространства состояния объекта) [21, 24], или повышением степени полинома  $R(s)$  относительно (1)

$$\deg R(s) = \deg A(s) - 1 + \nu, \tag{4}$$

где  $\nu$  – требуемая степень астатизма. Второй способ позволяет произвольным образом назначать коэффициенты знаменателя ПФР [21].

Астатизм по управляющему воздействию обеспечивается совокупным использованием интеграторов в контуре управления и соответствующих коэффициентов полинома  $Q(s)$  [20, 24] префильтра (рис. 1,а,б):

$$H_F(s) = \frac{Q(s)}{R(s)} \text{ или } H_F(s) = \frac{Q(s)}{C(s)}. \quad (5)$$

Недостатком данного структурного решения также является высокая сложность управляющего устройства из-за наличия префильтра.

Поставим задачу разработки метода упрощения управляющего устройства для статических и астатических систем автоматического управления, не требующего или требующего минимальных дополнительных вычислений без потери качества управления.

**Редукция управляющего устройства.** Примем за основу структуру на рис. 1,а с префильтром (3). Для структуры на рис. 1,б результат будет идентичным.

Для синтеза регулятора примем  $\deg A(s) = n$ ,  $\deg R(s) = n - 1 = k$ . Для большей общности положим, что степень полинома знаменателя ПФ регулятора

$$\deg C(s) = l \leq k. \quad (6)$$

Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} C(s)u(s) &= R(s)\Delta, \quad \Delta = y_0^*(s) - y(s), \quad y_0^*(s) = \frac{1}{R(s)}y_0(s), \\ (s^l + c_{l-1}s^{l-1} + \dots + c_1s + c_0)u(s) &= \\ &= y_0(s) - (r_k s^k + r_{k-1}s^{k-1} + \dots + r_1s + r_0)y(s) \\ s^l u(s) &= y_0(s) - r_k s^k y(s) - r_{k-1}s^{k-1}y(s) - r_1s y(s) - r_0y(s) - \\ &- c_{l-1}s^{l-1}u(s) - c_{l-2}s^{l-2}u(s) - \dots - c_1s u(s) - c_0u(s), \\ u(s) &= y_0 s^{-l}(s) - r_k s^{k-l}y(s) - r_{k-1}s^{k-1-l}y(s) - r_1s^{1-l}y(s) - r_0s^{-l}y(s) - \\ &- c_{l-1}s^{l-1-l}u(s) - c_{l-2}s^{l-2-l}u(s) - \dots - c_1s^{1-l}u(s) - c_0s^{-l}u(s). \end{aligned}$$

В общем случае степени полиномов  $R(s)$  и  $C(s)$  могут быть не равны ( $\deg C(s) < \deg R(s)$ ,  $l < k$ ). Поэтому структура регулятора будет содержать интегрирующие и дифференцирующие элементы (рис. 2).

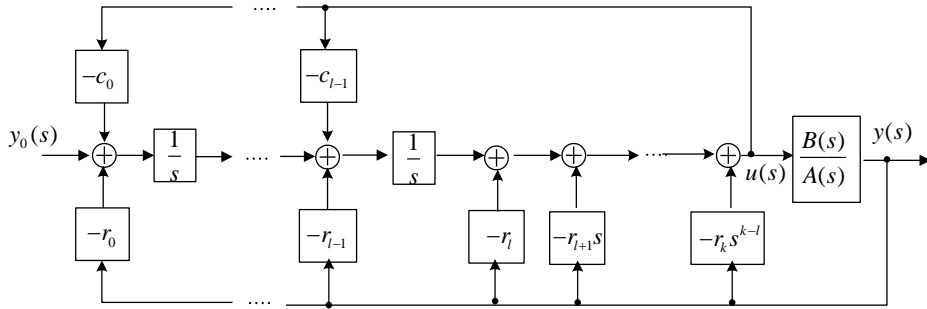


Рис. 2. Структура САУ с редуцированным регулятором

Данная реализация имеет количество интеграторов в два раза меньше по сравнению с САУ с префильтром (рис. 1), обеспечивая при этом заданное качество переходных процессов.

В этом случае астатизм по возмущениям может быть обеспечен любым из указанных выше способов (для второго способа необходимо принять  $\deg R(s) > n - 1 = k$ ).

Следящие системы требуют астатизма, как по управляющему воздействию, так и возмущениям [20]. Обычно это обеспечивают введением соответствующего количества интеграторов в контур управления [24]. Однако наличие префильтров (рис. 1) с передаточными функциями (3), равно как и их кажущееся отсутствие (рис. 2) не позволяют получить астатизм по задающему воздействию.

В этом случае необходимо использование префильтров (5). Наличие полинома  $Q(s)$  [25, 26] позволяет выбором соответствующих значений коэффициентов  $q_i$  обеспечить порядок астатизма

$$v = \deg Q(s) \leq \deg C(s) \quad (7)$$

по задающему воздействию.

Использование предложенного подхода упрощения структуры управляющего устройства возможно и в этом случае:

$$C(s)u(s) = R(s)\Delta(s),$$

$$\Delta(s) = y_0^*(s) - y(s), \quad y_0^*(s) = \frac{Q(s)}{R(s)}y_0(s),$$

$$C(s)u(s) = R(s) \left( \frac{Q(s)}{R(s)}y_0(s) - y(s) \right) = Q(s)y_0(s) - R(s)y(s).$$

Если учесть (6), (7) и принять:

$$\deg Q(s) = \deg C(s) = l,$$

то получим

$$\begin{aligned} & (s^l + c_{l-1}s^{l-1} + \dots + c_1s + c_0)u(s) = \\ & = (q_k s^k + \dots + q_1s + q_0)y_0(s) - (r_k s^k + r_{k-1}s^{k-1} + \dots + r_1s + r_0)y(s), \\ & s^l u(s) = q_l s^l y_0(s) + \dots + q_1 s y_0(s) + q_0 y_0(s) - \\ & r_k s^k y(s) - r_{k-1} s^{k-1} y(s) - \dots - r_1 s y(s) - r_0 y(s) - \\ & - c_{l-1} s^{l-1} u(s) - \dots - c_1 s u(s) - c_0 u(s), \\ & u(s) = q_l s^{l-l} y_0(s) + \dots + q_1 s^{1-l} y_0(s) + q_0 s^{-l} y_0(s) - \\ & - r_k s^{k-l} y(s) - r_{k-1} s^{k-1-l} y(s) - \dots - r_1 s^{1-l} y(s) - r_0 s^{-l} y(s) - \\ & - c_{l-1} s^{l-1-l} u(s) - \dots - c_1 s^{1-l} u(s) - c_0 s^{-l} u(s). \end{aligned}$$

При этом  $V$  коэффициентов  $q_i$ , рассчитанных из условия равенства нулю  $V$  коэффициентов ошибки, см., например [25, 26], будут равны коэффициентам  $r_i$ :

$$q_i = r_i, \quad i = \overline{0, v-1} \quad (8)$$

для **любой** из структур рис. 3, поэтому никаких дополнительных вычислений при синтезе регуляторов, обеспечивающих астатизм  $V$ -го порядка к задающему воздействию также не требуется.

Безусловно, необходимо помнить, что в контуре управления должно быть соответствующее требуемой степени астатизма количество интеграторов.

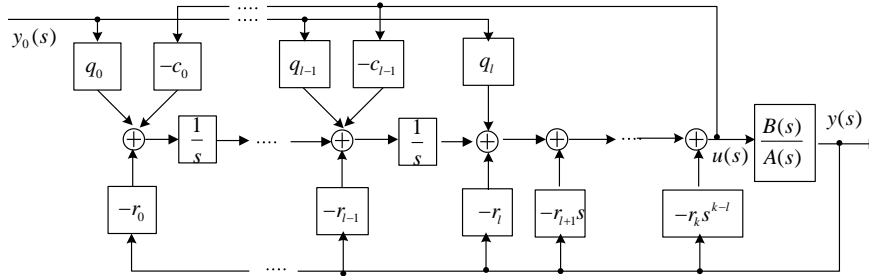


Рис. 3. Редуцированная САУ с астатизмом по управляющему воздействию

**Пример.**

Пусть необходимо обеспечить астатизм по задающему воздействию и по возмущению некоторого объекта (рис. 4). Задающее воздействие является линейно нарастающим сигналом  $y_0(t) = 1 \cdot t$ , возмущение – ступенчатым сигналом  $f(t) = 1(t)$ . При приложении ступенчатого задающего воздействия необходим переходный процесс длительностью не выше 0,2 с.

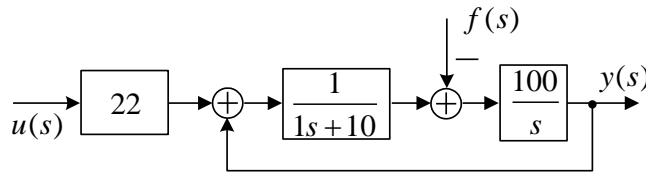


Рис. 4. Структурная схема объекта управления

Передаточная функция объекта имеет вид:

$$H(s) = \frac{2200}{s^2 + 10s + 100}.$$

Так как  $\deg A(s) = 2$ , то согласно (1) и (4) примем

$$\deg R(s) = n - 1 + v = 3,$$

получив возможность произвольно назначить значения двух коэффициентов полиномов ПРФ.

Далее рассмотрим два варианта реализации управляющего устройства.

**Вариант 1.** Для технически реализуемого регулятора примем

$$\deg C(s) = 3.$$

Тогда

$$\deg D(s) = 2 + 3 = 5.$$

Задавшись для обеспечения необходимого быстродействия значением среднегеометрического корня  $\Omega_0 = 50 \text{ c}^{-1}$  полинома Ньютона  $D(s) = (s + \Omega_0)^5$ , приняв для обеспечения возможности получения требуемой степени астатизма по задающему воздействию  $c_0 = 0$ ,  $c_1 = 0$  и решив уравнение синтеза (2), получим передаточную функцию регулятора:

$$H_R(s) = \frac{R(s)}{C(s)} = \frac{10,23s^3 + 557,3s^2 + 14204,5s + 142045}{s^3 + 240s^2}$$

Для обеспечения астатизма второго порядка по задающему воздействию согласно (8) необходимо принять  $q_i = r_i, i = \overline{0, 1}$  ( $Q(s) = 14204,5s + 142045$ ).

Если ввести понятие ошибки регулирования  $\Delta(s) = y_0(s) - y(s)$ , то структура САУ примет вид, изображенный на рис. 5.

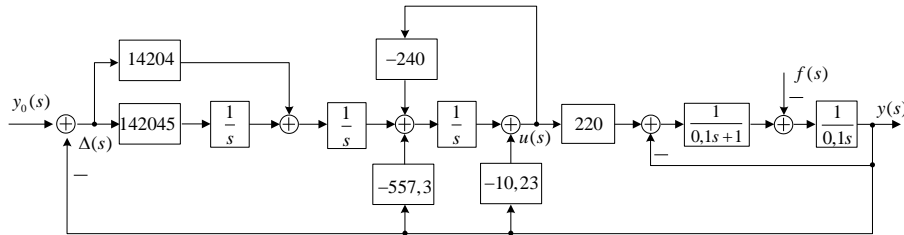


Рис. 5. Структурная схема САУ с редуцированным технически реализуемым регулятором

Переходные процессы по ошибке регулирования в САУ при приложении задающего воздействия вида  $y_0(t) = 1 \cdot t$  в нулевой момент времени и возмущающего воздействия в виде ступенчатого сигнала  $f(t) = 1(t)$  в момент времени 1 с приведены на рис. 6,а.

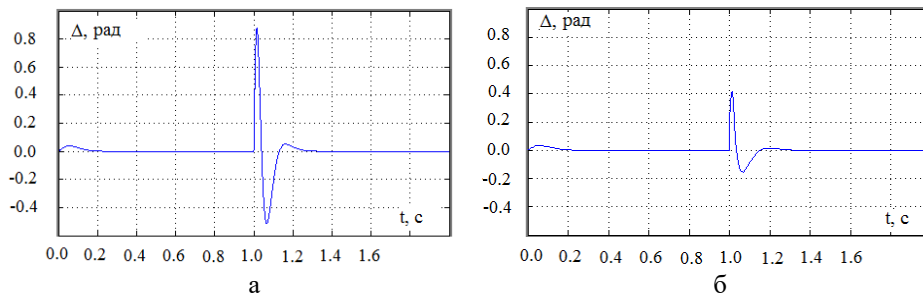


Рис. 6. Переходные процессы по ошибке регулирования

**Вариант 2.** Степень полинома  $C(s)$  может быть уменьшена с учетом (6), (5). В нашем случае  $\nu = 2$ . Тогда

$$\deg C(s) = 2 \text{ и } \deg D(s) = 2 + 2 = 4.$$

Для сохранения необходимого быстродействия зададимся новым значением  $\Omega_0 = 40 \text{ c}^{-1}$  среднегеометрического корня полинома Ньютона  $D(s) = (s + \Omega_0)^4$  и, решив уравнение синтеза при  $c_0 = 0, c_1 = 0$ , получим передаточную функцию регулятора:

$$H_R(s) = \frac{R(s)}{C(s)} = \frac{0,068s^3 + 4,36s^2 + 116,36s + 1163,63}{s^2}$$

Для обеспечения астатизма по задающему воздействию используем полином  $Q(s) = 116,36s + 1163,63$ . Структура САУ приведена на рис. 7, а переходный процесс по ошибке – на рис. 6,б.

Данное исполнение позволяет не только несколько упростить структуру управляющего устройства в сравнении с вариантом 1, но и значительно (на два порядка) уменьшить значения коэффициентов полиномов, что может быть полезно при технической реализации САУ. Также практически в два раза уменьшается максимальное отклонение управляемой величины при приложении возмущающего воздействия. Для реализации операции дифференцирования можно воспользоваться приближенным вычислением производных, например, методом Эйлера.

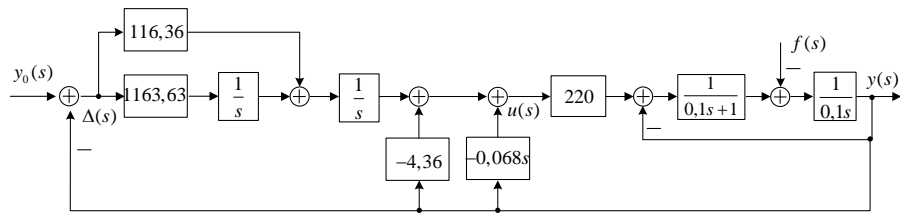


Рис. 7. Структурная схема САУ с дифференцирующим регулятором

### Основные результаты

1. Предложен способ редукции управляющего устройства, полученного в результате применения метода синтеза полиномиальных регуляторов, основанный на эквивалентных структурных преобразованиях и позволяющий снизить его порядок без изменения качества переходных процессов.
2. Отличительной особенностью предложенного способа редукции является отсутствие необходимости пересчета коэффициентов полиномов передаточной функции регулятора, полученных на основе решения уравнения синтеза, для реализации редуцированного управляющего устройства.
3. Использование предложенного способа позволяет проводить редукцию управляющих устройств статических систем, а также астатических систем с заданной степенью астатизма по управляющему воздействию и возмущениям
4. Предложенный способ позволяет проводить редукцию дифференцирующих и технически реализуемых управляющих устройств.
5. Возможность выбора рационального значения степени полинома  $C(s)$  может быть полезна при технической реализации управляющего устройства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тамьяров А.В., Тамьярова М.В. Аппроксимация передаточных функций оптимальных регуляторов высокого порядка систем автоматического управления // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2011. – № 17. – С. 94-99.
2. Честнов В.Н., Зацепилова Ж.В. Понижение порядка SISO-регуляторов на основе критерия Найквиста // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 241-247.
3. Федюков А.А. Стабилизация систем с фазовыми ограничениями с помощью динамических регуляторов пониженного порядка // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 338-344.
4. Бойченко В.А., Курдюков А.П., Тимин В.Н., Чайковский М.М., Ядыкин И.Б. Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры // Управление большими системами: Сб. трудов. –2007. – Т. 19. – С. 23-126.



5. *Алексеев А.С., Антропов м, Гончаров В.И., Замятин С.В., Рудницкий В.А.* Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 219 с.
6. *Акимов Л.В., Литвиненко Д.Г.* Исследование параметрического астатизма при синтезе регуляторов сложных электромеханических систем полиномиальным методом // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 4. – С. 7-14.
7. *Бобобеков К.М., Воевода А.А.* Синтез двухканальной системы полиномиальным методом: обеспечение астатизма // Сб. научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (83). – С. 7-19.
8. *Пирожок А.В.* Синтез полиномиального регулятора натяжения полосы // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3 (19). – С. 172-174.
9. *Воронин А.В., Щелканова Т.А.* Синтез полиномиального регулятора с учетом возмущений // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 4 (5). – С. 165-170.
10. *Ишматов З.Ш., Волков М.А., Гурентьев Е.А.* Робастная система управления электроприводом // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 2 (544). – С. 30-33.
11. *Casavola A., Grimble E., Mosca S., Nistri P.* Continuous-time LQ regulator design by polynomial equations // Automatica. – 1991. – Vol. 27, No. 3. – P. 555-558.
12. *Тарарыкин С.В., Аполонский В.В.* Понижение порядка полиномиальных регуляторов динамических систем // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 3 (9). – С. 96-100.
13. *Kubalcik M., Bobal V.* Control Algorithms with Suppression of Measurable Disturbances: Comparison of Two Methods // WSEAS transactions on systems and control. – 2013. – Vol. 8, No. 3. – P. 94-104.
14. *Волгин Л.Н.* Элементы теории управляющих машин (метод полиномиальных уравнений в задачах синтеза систем автоматического управления с цифровыми вычислительными машинами). – М.: Советское радио. 1962. – 164 с.
15. *Гайдук А.Р.* Синтез систем управления по передаточным функциям // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С. 11-16.
16. *Kučera V.* Discrete Linear Control. The Polynomial Equation Approach. – Prague: Academia, 1979. – 315 с.
17. *Волгин Л.Н.* Оптимальное дискретное управление динамическими системами – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 240 с.
18. *Скворцов Л.М.* Синтез линейных систем методом полиномиальных уравнений // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 6. – С. 54-59.
19. *Grimble M.J., Kucera V.* Polynomial Methods for Control Systems Design. – Springer-Verlag, 1996. – 255 с.
20. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
21. *Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.* Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново: ИГЭУ, 2006. – 256 с.
22. *Бесекерский В.А., Изранцев В.В.* Системы автоматического управления с микро-ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
23. *Phillips C., Harbor R.* Feedback Control systems. – Prentice hall, Inc., 2000. – 616 с.
24. *Мееров М.В.* Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967. – 424 с.
25. *Гайдук А.Р.* Основы теории систем автоматического управления. – М.: УМИИЦ «Учебная литература», 2005. – 405 с.
26. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966. – 992 с.

## REFERENCES

1. *Tam'yarov A.V., Tam'yarova M.V.* Approksimatsiya peredatochnykh funktsiy optimal'nykh regulyatorov vysokogo porjadka sistem avtomaticheskogo upravleniya [Approximation of transfer functions of optimal controllers of high order automatic control systems], *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva* [Bulletin of the Volga University. V.N. Tatishcheva], 2011, No. 17, pp. 94-99.

2. Chestnov V.N., Zatsopilova Zh.V. Ponizhenie poryadka SISO-regulyatorov na osnove kriteriya Naykvista [A reduction of order SISO-controllers based on the Nyquist criterion], *Trudy XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya (VSPU-2014, Moskva)* [Proceedings of XII all-Russian conference on control problems (VSPU-2014, Moscow)]. Moscow: IPU RAN, 2014, pp. 241-247.
3. Fedyukov A.A. Stabilizatsiya sistem s fazovymi ogranicheniyami s pomoshch'yu dinamicheskikh regulyatorov ponizhennogo poryadka [Stabilization of systems with phase constraints using dynamic reduced order controllers], *Trudy XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya (VSPU-2014, Moskva)* [Proceedings of XII all-Russian conference on control problems (VSPU-2014, Moscow)]. Moscow: IPU RAN, 2014, pp. 338-344.
4. Boychenko V.A., Kurdyukov A.P., Timin V.N., Chaykovskiy M.M., Yadykin I.B. Nekotorye metody sinteza regulyatorov ponizhennogo poryadka i zadannoy struktury [Some methods of synthesis of controllers of low order, and the specified structure], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Cb. trudov* [Managing large systems: Collection of papers], 2007, Vol. 19, pp. 23-126.
5. Alekseev A.S., Antropov m, Goncharov V.I., Zamyatin S.V., Rudnitskiy V.A. Veshchestvennyy interpolatsionnyy metod v zadachakh avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobie [Real interpolation method in problems of automatic control: a tutorial]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 219 p.
6. Akimov L.V., Litvinenko D.G. Issledovanie parametricheskogo astatizma pri sinteze regulyatorov slozhnykh elektromekhanicheskikh sistem polinomial'nym metodom [A parametric study of astatic in the synthesis of regulators of complex electromechanical systems of polynomial method], *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy* [Electrotechnical and computer systems], 2011, No. 4, pp. 7-14.
7. Bobobekov K.M., Voevoda A.A. Sintez dvukhkanal'noy sistemy polinomial'nym metodom: obespechenie astatizma [Synthesis of two-channel system of polynomial method: astatic], *Sb. nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific papers of Novosibirsk state technical university], 2016, No. 1 (83), pp. 7-19.
8. Pirozhok A.V. Sintez polinomial'nogo regulyatora natyazheniya polosy [Synthesis of polynomial regulator of tension strip], *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi* [Electromechanical and energy saving systems], 2012, No. 3 (19), pp. 172-174.
9. Voronin A.V., Shchelkanova T.A. Sintez polinomial'nogo regulyatora s uchetom vozmushcheniy [The polynomial controller synthesis taking into account the perturbations], *Vestnik nauki Sibiri* [Journal of science of Siberia], 2012, No. 4 (5), pp. 165-170.
10. Ishmatov Z.Sh., Volkov M.A., Gurent'ev E.A. Robastnaya sistema upravleniya elektroprivodom [Robust control system electric drive], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2016, No. 2 (544), pp. 30-33.
11. Casavola A., Grimble E., Mosca S., Nistri P. Continuous-time LQ regulator design by polynomial equations, *Automatica*, 1991, Vol. 27, No. 3, pp. 555-558.
12. Tararykin S.V., Apolonskiy V.V. Ponizhenie poryadka polinomial'nykh regulyatorov dinamicheskikh sistem [Lowering the order of polynomial controls of dynamic systems], *Vestnik nauki Sibiri* [Journal of science of Siberia], 2013, No. 3 (9), pp. 96-100.
13. Kubalcik M., Bobal V. Control Algorithms with Suppression of Measurable Disturbances: Comparison of Two Methods, *WSEAS transactions on systems and control*, 2013, Vol. 8, No. 3, pp. 94-104.
14. Volgin L.N. Elementy teorii upravlyayushchikh mashin (metod polinomial'nykh uravneniy v zadachakh sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya s tsifrovymi vychislitel'nymi mashinami) [Elements of the theory of controlling machines (the method of polynomial equations in the problems of synthesis of automatic control systems with digital computers)]. Moscow: Sovetskoe radio. 1962, 164 p.
15. Gayduk A.R. Sintez sistem upravleniya po peredatochnym funktsiyam [The synthesis of control systems by transfer functions], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 1980, No. 1, pp. 11-16.
16. Kučera V. Discrete Linear Control. The Polynomial Equation Approach. Prague: Academia, 1979, 315 p.
17. Volgin L.N. Optimal'noe diskretnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami [Optimal discrete control of dynamic systems]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986, 240 p.

18. Skvortsov L.M. Sintez lineynykh sistem metodom polinomial'nykh uravneniy [Synthesis of linear systems by polynomial equation], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 1991, No. 6, pp. 54-59.
19. Grimble M.J., Kucera V. Polynomial Methods for Control Systems Design. Springer-Verlag, 1996, 255 p.
20. Gayduk A.R. Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyu podkhod) [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 360 p.
21. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob'ektami [Robust modal control of technological objects]. Ivanovo: IGEU, 2006, 256 p.
22. Besekerskiy V.A., Izrantsev V.V. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s mikro-EVM [Automatic control systems with micro-computers]. Moscow: Nauka, 1987, 320 p.
23. Phillips C., Harbor R. Feedback Control systems. Prentice hall, Inc., 2000, 616 p.
24. Meerov M.V. Sintez struktur sistem avtomaticheskogo regulirovaniya vysokoy tochnosti [Synthesis of structures of automatic control systems of high accuracy]. Moscow: Nauka, 1967, 424 p.
25. Gayduk A.R. Osnovy teorii sistem avtomaticheskogo upravleniya [Fundamentals of the theory of automatic control systems]. Moscow: UmilTs «Uchebnaya literatura», 2005, 405 p.
26. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [The theory of automatic control systems]. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1966, 992 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Гайдук.

**Тютиков Владимир Валентинович** – ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»; e-mail: tvv@ispu.ru; г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34; тел.: 84932415024; д.т.н.; профессор; проректор по научной работе.

**Шляцкая Елена Михайловна** – e-mail: lenashlyatskaya@mail.ru; магистрант.

**Tyutikov Vladimir Valentinovich** – Ivanovo state power university; e-mail: tvv@ispu.ru; 34, Rabfakovskaya street, Ivanovo, Russia; phone: +74932415024; dr. of eng. sc.; professor; Pro-rector on scientific work.

**Shlyatskaya Elena Mikhailovna** – e-mail: lenashlyatskaya@mail.ru; undergraduate.

УДК 517.988

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-74-91

**А.А. Кулешова, Е.А. Щелоков**

### **ДИСКРЕТНАЯ ФАЗОВАЯ ПРОБЛЕМА В ВОССТАНОВЛЕНИИ СИГНАЛОВ В ИЗДЕЛИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

*Рассматривается задача передачи информации по беспроводному интерфейсу в составе изделий ракетно-космической техники. Целью работы является исследование основных характеристик приёмо-передатчиков в составе изделий ракетно-космической техники (а именно в условиях плотной компоновки аппаратуры и металлических конструкций). В качестве основы для определения доступности приёмо-передатчиков в составе плотной компоновке выбраны устройства типа Wi-fi с модуляцией OFDM и произведено моделирование в двухмерном режиме дополнительно в условиях металлических конструкций с помощью САПР tagoграф, в результате доказана возможность передачи данных в условиях плотной компоновки приборов, а также сложной электромагнитной обстановки, вызванной металлическими конструкциями. Поиск быстрых алгоритмов для восстановления сигнала без фаз актуален в настоящее время. Главное свойство фреймов, которое делает их настолько полезными в прикладных задачах – их избыточность. Хорошо выбранный фрейм может обеспечить численную устойчивость для восстановления сигнала и получение важного характеристика сигнала. Семейство фреймов восстанавливает сигнал по абсолютному значению фреймовых коэффициентов в полиномиальное время. Показано, что в действительном случае фрейм общего положения, состоящий из  $(2m-1)$ -векторов может при оп-*