

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 621.11-32

Александрова Т. Е.¹, Кононенко В. А.², Лазаренко А. А.³, Зейн Али³¹Канд. техн. наук, доцент Национального технического университета «ХПИ»²Канд. техн. наук, старший научный сотрудник Национального технического университета «ХПИ»³Аспирант Национального технического университета «ХПИ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ПД-СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ФИЛЬТРАМИ БАТТЕРУОРТА И ЛАНЦОША

Рассматривается проблема построения цифровых ПД-стабилизаторов подвижных объектов с зашумленными высокочастотными помехами входными сигналами. Проведен сравнительный анализ стабилизаторов с фильтрами Баттеруорта и Ланцоша различных порядков.

Ключевые слова: цифровой ПД-стабилизатор, низкочастотный фильтр, дифференцирующий фильтр.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В качестве чувствительных элементов систем стабилизации подвижных объектов, в частности, объектов военного назначения, обычно используется гироскопические платформы с нелинейной системой коррекции [1, 2]. В работе [3] показано, что оси таких гироскопических платформ совершают высокочастотные колебания, приводящие к зашумленности измеряемых параметров движения высокочастотными помехами. При разработке цифровых стабилизаторов подвижных объектов широкое распространение получили низкочастотные цифровые фильтры, подавляющие высокочастотные помехи. Среди большого разнообразия цифровых фильтров наиболее распространенными и эффективными являются низкочастотные фильтры Баттеруорта и Ланцоша [4]. В данной статье рассматривается проблема рационального использования цифровых фильтров различного порядка при построении ПД-стабилизаторов подвижных объектов.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работах [4, 5] приведены АЧХ и ФЧХ фильтров Баттеруорта и Ланцоша различного порядка. Показано, что фильтры Баттеруорта, имея практически идеальную АЧХ, в смысле подавления высокочастотных помех, вносят значительное фазовое запаздывание при прохождении дискретного сигнала. Фильтры же Ланцоша, наоборот, вносят значительное фазовое опережение, возрастающее с повышением порядка фильтра и с улучшением его фильтрующих свойств. В работах [6, 7] получены аналитические соотношения для АЧХ и ФЧХ фильтров Баттеруорта и Ланцоша различных порядков, позволяющие произвести оценку динамических свойств цифровых стабилизаторов с данными фильтрами.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей статьи является сравнительный анализ динамических характеристик ПД-стабилизаторов подвижных объектов при использовании цифровых фильтров различного порядка.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим цифровой ПД – стабилизатор, структурная схема которого приведена на рис. 1.

Для рассмотренного стабилизатора можно записать

$$Z\{U[nT]\} = \{k_{\phi}W_{\phi}(z) + k_{\lambda}W_{\lambda}(z)\}Z\{\varphi[nT]\}, \quad (1)$$

где $Z\{.\}$ – символ Z-преобразования. Тогда дискретная передаточная функция ПД-стабилизатора, выполненного по параллельной схеме, равна

$$W_{ПД}(z) = \frac{Z\{U[nT]\}}{Z\{\varphi[nT]\}} = k_{\phi}W_{\phi}(z) + k_{\lambda}W_{\lambda}(z). \quad (2)$$

Передаточные функции фильтров Баттеруорта и Ланцоша второго порядка записываются в виде [4]

$$W_{\phi}(z) = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + a_0z^{-2}}{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}; \quad (3)$$

$$W_{\lambda}(z) = c_0 + c_1z^{-1} - c_1z^{-3} - c_0z^{-4}. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в формулу (2), получим передаточную функцию ПД-стабилизатора, представленного на рис. 1.

$$W_{ПД}(z) = \frac{k_{\phi}(d_0 + d_1z^{-1} + d_0z^{-2}) + k_{\lambda}(f_0 + f_1z^{-1} + f_2z^{-2} + f_3z^{-3}) - f_4z^{-4} - f_5z^{-5} - f_6z^{-6}}{1 + l_1z^{-1} + l_1z^{-2}}, \quad (5)$$

где соответствующие постоянные связаны с параметрами фильтров (3) и (4) соотношениями

$$d_0 = \frac{a_0}{b_0}; \quad d_1 = \frac{a_1}{b_0}; \quad f_0 = c_0; \quad f_1 = \frac{b_0c_1 + b_1c_0}{b_0};$$

$$f_2 = \frac{b_1c_1 + b_2c_0}{b_0}; \quad f_3 = \frac{c_1(b_2 + b_0)}{b_0}; \quad f_4 = \frac{b_0c_0 + b_1c_1}{b_0};$$

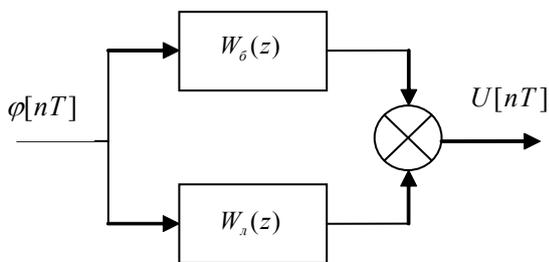


Рис. 1. ПД-стабилизатор, выполненный по параллельной схеме:

$W_{\phi}(z)$ – фильтр Баттеруорта; $W_{\lambda}(z)$ – фильтр Ланцоша

$$f_5 = \frac{b_1c_0 + b_2c_1}{b_0}; \quad f_6 = \frac{b_2c_0}{b_0};$$

$$l_1 = \frac{b_1}{b_0}; \quad l_2 = \frac{b_2}{b_0}.$$

К обеим частям соотношения (5) применим операцию обратного Z-преобразования, в результате чего получаем разностное уравнение рассматриваемого ПД-стабилизатора

$$U[nT] = k_{\phi}\{d_0\varphi[nT] + d_1\varphi[(n-1)T] + d_0\varphi[(n-2)T]\} + k_{\lambda}\{f_0\varphi[nT] + f_1\varphi[(n-1)T] + f_2\varphi[(n-2)T] + f_3\varphi[(n-3)T] - f_4\varphi[(n-4)T] - f_5\varphi[(n-5)T] - f_6\varphi[(n-6)T]\} - l_1U[(n-1)T] - l_2U[(n-2)T]. \quad (6)$$

В качестве примера рассмотрим фильтры (3) и (4) с параметрами: $a_0=0,08073$; $a_1=0,16147$; $b_0=1,48256$; $b_1=-1,83854$; $b_2=0,677890$; $c_0=5$; $c_1=2,5$. Используя соотношение (6), построим АЧХ и ФЧХ рассматриваемого ПД-стабилизатора, приведенного на рис. 2, при различных значениях варьируемых параметров k_{ϕ} , k_{λ} . Для этого на входе линейного цифрового стабилизатора (6) сформируем синусоидальную решетчатую функцию

$$\varphi[nT] = A \sin \omega nT. \quad (7)$$

При этом на выходе стабилизатора, в соответствии с алгоритмом (6), имеет место синусоидальная решетчатая функция

$$U[nT] = B(\omega T) \sin[\omega(nT) + \varphi(nT)]. \quad (8)$$

Для каждого текущего значения ωT вычисляется значение АЧХ

$$M(\omega T) = \frac{B(\omega T)}{A},$$

и измеряется фазовый сдвиг $\varphi(\omega T)$ выходного сигнала (8) относительно входного (7).

Анализ АЧХ и ФЧХ позволяет сделать вывод, что стабилизатор (6) плохо подавляет высокочастотные помехи и вносит в систему при низких частотах значительное фазовое опережение. Объясняется это тем, что в схеме, представленной на рис. 1, на фильтр Ланцоша подается зашумленный высокочастотными помехами входной сигнал, а подавление фильтром Ланцоша высоких частот не всегда эффективно.

В связи с изложенным, предлагается использование последовательно-параллельной схемы ПД-стабилизатора, представленной на рис. 3. В этой схеме на фильтр Ланцоша подается уже отфильтрованный низкочастотным фильтром Баттеруорта сигнал $\tilde{\varphi}(nT)$.

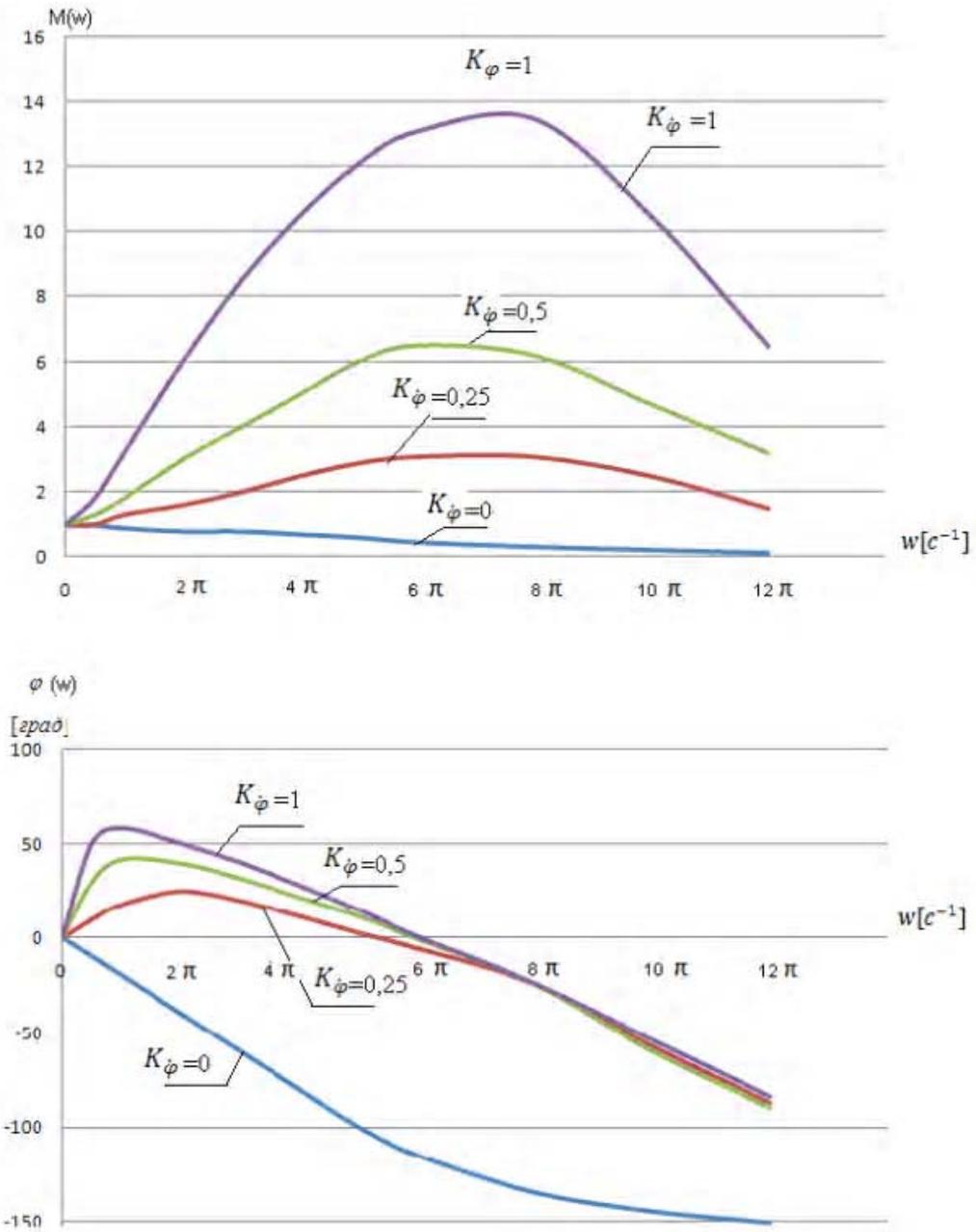


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ ПД-стабилизатора, выполненного по параллельной схеме

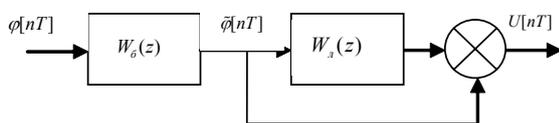


Рис. 3. ПД-стабилизатор, выполненный по последовательно-параллельной схеме

$$W_{\text{ПД}}(z) = \frac{k_\phi \{d_0 + d_1 z^{-1} + d_0 z^{-2} + k_\phi (f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} - f_2 z^{-4} - f_1 z^{-5} - f_0 z^{-6})\}}{1 + l_1 z^{-1} + l_2 z^{-2}}, \quad (9)$$

где постоянные f_0 , f_1 и f_2 равны:

$$f_0 = \frac{a_0 c_0}{b_0}; \quad f_1 = \frac{a_0 c_1 + a_1 c_0}{b_0}; \quad f_2 = \frac{a_0 c_0 + a_1 c_1}{b_0},$$

а соответствующее передаточной функции (9) разностное уравнение ПД-стабилизатора имеет вид

$$\begin{aligned}
 U[nT] = & k_{\varphi} \{ d_0 \varphi[nT] + d_1 \varphi[(n-1)T] + \\
 & + d_0 \varphi[(n-2)T] + k_{\dot{\varphi}} (f_0 \varphi[nT] + \\
 & + f_1 \varphi[(n-1)T] + f_2 \varphi[(n-2)T] - \\
 & - f_2 \varphi[(n-4)T] - f_1 \varphi[(n-5)T] - \\
 & - f_0 \varphi[(n-6)T]) \} - l_1 U[(n-1)T] - \\
 & - l_2 U[(n-2)T]. \tag{10}
 \end{aligned}$$

На рис. 4 приведены АЧХ и ФЧХ стабилизатора (10). Подавление высоко-частотных помех стабилизатором

(10) значительно эффективнее, чем стабилизатором (6), а фазовое опережение, вносимое фильтром Ланцоша, значительно ниже, чем при использовании стабилизатора (6). Кроме того, выбором значения коэффициента $k_{\dot{\varphi}}$ при определенной частоте фазовый сдвиг может быть установлен равным нулю. Обычно это целесообразно при собственной частоте колебаний подвижного объекта. Так, для объектов бронетехники собственная частота колебаний подрессоренной массы обычно составляет 1,2 – 1,5 Гц.

Анализ цифрового ПД-стабилизатора, выполненного по последовательно-параллельной схеме, показывает, что его высокие динамические свойства обусловлены тем, что на вход дифференцирующего фильтра Ланцоша подается выходной сигнал фильтра Баттеруорта,

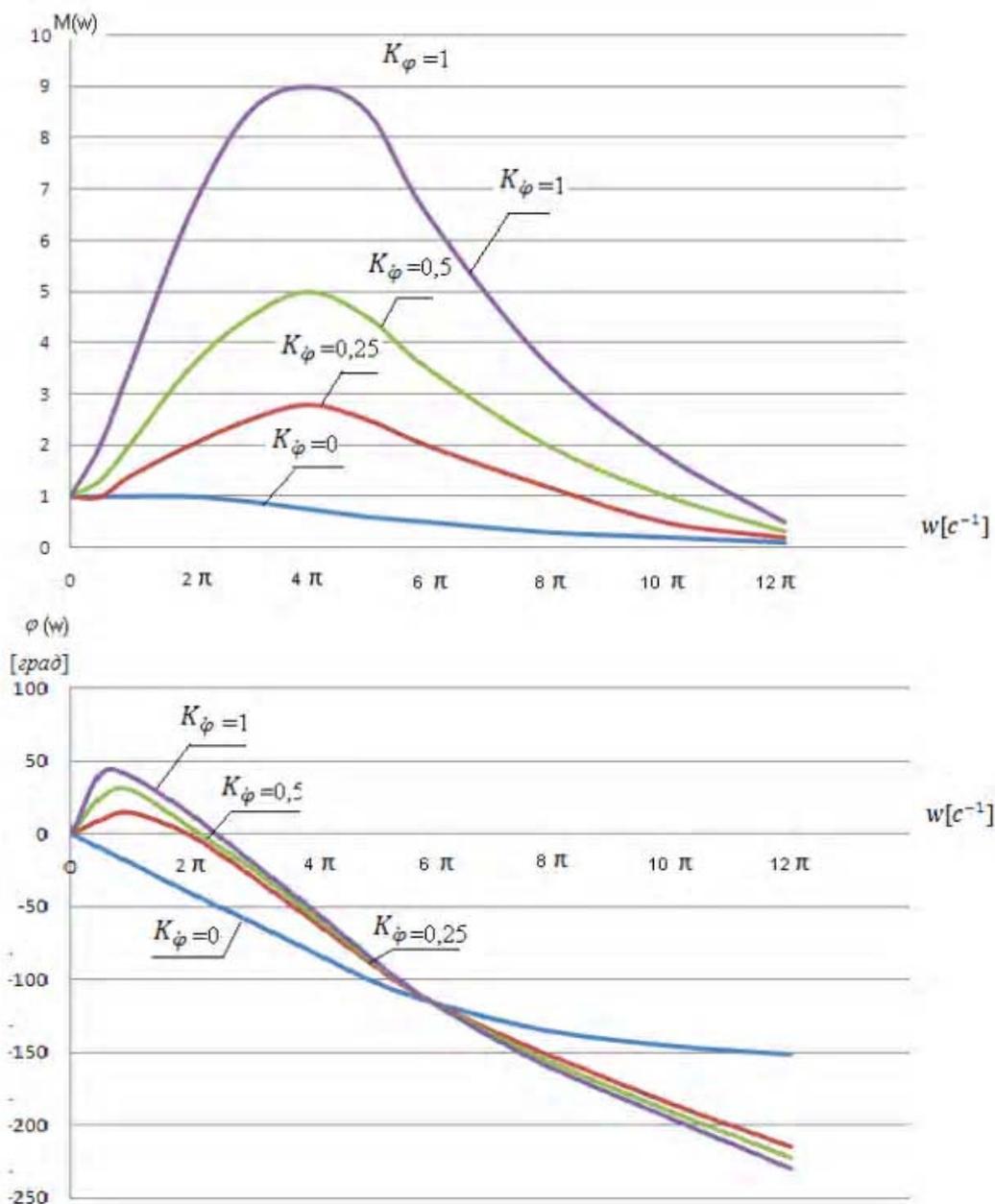


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ ПД-стабилизатора выполненного по последовательно-параллельной схеме

который практически не содержит высокочастотных помех. Рассмотрим ПД-стабилизатор, представленный на рис. 3, с фильтром Баттеруорта третьего порядка с передаточной функцией

$$W_6(z) = \frac{a_0(1+3z^{-1}+3z^{-2}+z^{-3})}{1+d_{10}z^{-1}+d_{20}z^{-2}+d_{30}z^{-3}}, \quad (11)$$

и фильтром Ланцоша первого порядка с передаточной функцией

$$W_6(z) = c_2(1-z^{-2}). \quad (12)$$

В результате получаем передаточную функцию ПД-стабилизатора в виде

$$W_{\text{ПД}}(z) = \frac{k_{\phi}a_0\{1+3z^{-1}+3z^{-2}+z^{-3} + k_{\phi}c_2(1+3z^{-1}+2z^{-2}-2z^{-3}-3z^{-4}-z^{-5})\}}{1+d_{10}z^{-1}+d_{20}z^{-2}+d_{30}z^{-3}}, \quad (13)$$

Соответствующий передаточной функции (13) алгоритм стабилизации записывается в виде

$$\begin{aligned} U[nT] = & k_{\phi}a_{10}\{\phi[nT] + 3\phi[(n-1)T] + \\ & + 3\phi[(n-2)T] + \phi[(n-3)T] + \\ & + k_{\phi}c_2(\phi[nT] + 3\phi[(n-1)T] + \\ & + 2\phi[(n-2)T] - 2\phi[(n-3)T] - \\ & - 3\phi[(n-4)T] - \phi[(n-5)T])\} - \\ & - d_{10}U[(n-1)T] - d_{20}U[(n-2)T] - \\ & - d_{30}U[(n-3)T]. \end{aligned} \quad (14)$$

Пусть параметры фильтров (11) и (12) составляют $a_{10}=0,012045$; $d_{10}=-1,93847$; $d_{20}=1,37229$; $d_{30}=-0,33745$; $c_2=12,5$.

Расчет АЧХ и ФЧХ ПД-стабилизатора (14) позволяет сделать вывод о том, что динамические характеристики стабилизаторов (10) и (14) практически совпадают. Некоторое ухудшение фильтрующих свойств фильтра Ланцоша первого порядка по сравнению с фильтром второго порядка компенсируется использованием фильтра Баттеруорта третьего порядка с практически идеальной АЧХ, который весьма эффективно фильтрует высокочастотные помехи.

Таким образом, цифровые ПД-стабилизаторы подвижных объектов целесообразно формировать по последовательно-параллельной схеме в соответствии с алгоритмами стабилизации (10) и (14).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корнеев, В. В.* Основы автоматики и танковые автоматические системы / В. В. Корнеев, Л. П. Кузьмин, К. И. Павличук, М. И. Кузнецов. – М. : Академия БТВ, 1976. – 545 с.
2. *Аблесімов, О. К.* Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами. т. 3. Автоматичне керування озброєнням танків / О. К. Аблесімов, Є. Є. Александров, І. Є. Александрова. – Харків : НТУ «ХП», 2008. – 444 с.
3. *Александров, Е. Е.* Оценка точности стабилизации поля зрения прицела танковой пушки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – с. 40–44.
4. *Хемминг, Р. В.* Цифровые фильтры / Р. В. Хемминг. – М. : Недра, 1984. – 221 с.
5. *Ивашко, А. В.* Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов / А. В. Ивашко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – 240 с.
6. *Александров, Е. Е.* Синтез цифровых нерекурсивных фильтров для информационно-управляющих систем / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко / Техническая электродинамика. Специальный выпуск. Силовая электроника и энергоэффективность. – 2011 – т. 1. – с. 163–168.
7. *Александров, Е. Е.* Сравнительный анализ цифровых дифференцирующих фильтров / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко // В кн. : Автоматика / Automatics – 2011. XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління. Матеріали конференції. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 303–304.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2011.

Александрова Т. Є., Кононенко В. О., Лазаренко А. О., Зейн Алі

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ ПД-СТАБІЛІЗАТОРІВ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ З НИЗЬКОЧАСТОТНИМИ ФІЛЬТРАМИ БАТТЕРУОРТА І ЛАНЦОША

Розглядається проблема побудови цифрових ПД-стабілізаторів рухомих об'єктів із спотвореними завадами вхідними сигналами. Проведено порівняльний аналіз стабілізаторів з фільтрами Баттеруорта і Ланцоша різних порядків.

Ключові слова: цифровий ПД-стабілізатор, низькочастотний фільтр, диференціюючий фільтр.

Alexandrova T. Ye., Kononenko V. A., Lazarenko A. A., Zein Ali

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL PD-STABILIZERS OF MOBILE OBJECTS WITH LOW-FREQUENCY BUTTERWORT AND LANCZOS FILTERS

The problem of constructing a digital PD-stabilizers of mobile objects with noise input signals is discussed. The comparative analysis of the stabilizers with Butterwort and Lanczos filters of the various orders is considered.

Key words: digital PD-stabilizer, low-pass filter, differentiating filter.