

УДК 53.087.92:62-503.57

В.П. Казанцев, Н.И. Хорошев

## Адаптивные экстраполяторы нулевого порядка с переменным тактом квантования в адаптивных информационно-управляющих системах

Рассмотрены вопросы применения экстраполяторов нулевого порядка в составе адаптивных телеизмерительных и дискретно-непрерывных систем управления технологическими процессами. Показано, что в зависимости от характера изменения входного сигнала (величины приращения и скорости) целесообразно для поддержания требуемой точности аппроксимации или реализации предельного быстродействия отработки экстраполятором входного сигнала изменять определенным образом такт квантования. Поскольку в распространенных интегрированных средах научных и инженерных вычислений (MatLab/Simulink, Octave и др.) отсутствуют возможности исследования адаптивных телеизмерительных и управляющих систем в условиях изменения такта квантования, предложена модель экстраполяторов с переменным тактом квантования. Представлены результаты моделирования в среде MatLab/Simulink, которые могут быть положены в основу синтеза и анализа адаптивных телеизмерительных и управляющих систем.

**Ключевые слова:** экстраполятор нулевого порядка, квантование, телеизмерительная система, система управления, адаптация, моделирование.

**Постановка задач реализации адаптивных экстраполяторов нулевого порядка.** В современных телеизмерительных системах (ТИС) со сжатием данных и в широкополосных управляющих системах широко применяют адаптацию систем к изменению характеристик контролируемых сигналов [1–8].

Известно достаточно много схемотехнических решений экстраполяторов нулевого порядка (ЭНП), в том числе с изменяемым тактом квантования, на основе как аналоговой, так и цифровой схемотехники [2, 8–12]. Однако при решении задач синтеза и анализа адаптивных ТИС и систем управления в широко распространенных интегрированных средах, таких как MatLab/Simulink, возникают проблемы, обусловленные тем, что в их пакетах расширения отсутствуют модели ЭНП, позволяющие внешним сигналом менять такт квантования в соответствии с принятыми алгоритмами адаптации исследуемых систем. В пакете дискретных блоков среды MatLab/Simulink имеется блок ЭНП «Zero-Order Hold» [13–15], однако шаг квантования его входного сигнала можно изменить только внутренним заданием параметров блока, что существенно ограничивает возможности исследования адаптивных телеизмерительных и управляющих систем. По этой причине целью исследования являлась реализация моделей ЭНП, адаптированных к исследованию систем с переменным тактом дискретизации.

Для достижения поставленной цели в статье решались следующие взаимосвязанные задачи: формализация области применения и элементной базы реализации ЭНП; разработка модели экстраполяторов с переменным тактом квантования, моделирование адаптивной телеизмерительной системы в среде MatLab/Simulink.

**Формализация области применения и реализации адаптивных ЭНП.** ЭНП широко применяются в различных цифроаналоговых системах контроля и управления, выполняя функции устройств выборки-хранения (УВХ) и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП). В современных системах дистанционного контроля и управления технологическими процессами, предполагающими передачу информации от аналоговых и дискретных датчиков первичной информации к микропроцессорным контроллерам, их применение стало неизбежным. При этом они обеспечивают преобразование изменяющегося во времени аналогового или дискретного сигнала в квантованный по времени и ступенчато изменяющийся непрерывный сигнал. Процесс экстраполяции нулевого порядка предполагает своего рода прогнозирование стабильного значения входного сигнала в течение такта дискретизации по информации всего одной выборки [2, 9, 11], что предопределило столь широкое распространение ЭНП.

При экстраполяции аналогового сигнала ЭНП играют роль квантователей (фиксаторов) нулевого порядка или, что то же самое, УВХ, в основе которых лежат операционные усилители и конденсаторы с малыми токами утечки. В системах цифровой обработки сигналов этот сигнал в дальнейшем подвергают аналого-цифровому преобразованию (АЦП). Такт дискретизации при этом в большинстве случаев принимают постоянным, что позволяет отнести экстраполяторы к классу линейных подобъектов в задачах синтеза и анализа систем управления [16–19]. В телеизмерительных системах с целью сжатия, прореживания дискретной информации и дальнейшей передачи ее от источника к приемнику может осуществляться адаптивная к параметрам входного сигнала экстраполяция, причем, как правило, с переменным тактом дискретизации, что делает процесс аппроксимации заведомо нелинейным. При этом используется цифровая схемотехника на основе регистров памяти и микропроцессорных контроллеров [9–12]. Заметим, что применительно к процедурам фиксации аналоговых или дискретных значений сигналов во времени применяют разные по звучанию, но эквивалентные по сути понятия: шаг (такт, период) квантования (дискретизации).

**Моделирование телеизмерительной системы на базе адаптивных ЭНП.** Прежде всего, отметим, что модель процесса экстраполяции в большинстве исследований представляют в виде последовательного соединения идеального ключевого элемента, инициирующего факт выборки входного сигнала, и некоего фиксатора [16, 18, 19]. При этом сам процесс фиксации сигнала после момента выборки в структурах ЭНП представляют линейной передаточной функцией, содержащей последовательное соединение звена «чистого» запаздывания на такт дискретной выборки и интегрирующего звена. Такие модели не отражают специфику технической реализации ЭНП, а также не предоставляют структурной возможности аппроксимации входного сигнала без запаздывания или с опережающим фазовым сдвигом.

При автоматическом выборе такта дискретизации в адаптивных ТИС применяют те или иные критерии приближения (верности) измеряемой величины  $x(t)$  к базисной (воспроизводящей) функции  $\bar{x}(t)$ . Последняя в ЭНП представляет собой многоступенчатый непрерывный сигнал, аппроксимирующий входной измеряемый сигнал. Для оценки точности аппроксимации применяют множество критериев – интегральных, среднеквадратичных, вероятностно-зональных и др. [2, 4, 7, 8]. Не усложняя процесс восприятия и технической реализации, рассмотрим широко используемый и понятный в плане исследования критерий равномерного приближения (наибольшего отклонения) (1):

$$\varepsilon = \max |x(t) - \bar{x}(t)|, \quad (1)$$

где  $x(t)$  – входной измеряемый сигнал;  $\bar{x}(t)$  – сигнал на выходе экстраполятора нулевого порядка.

На рис. 1 приведена схема моделирования адаптивной ТИС в интегрированной среде MatLab/Simulink, реализующей критерий (1).

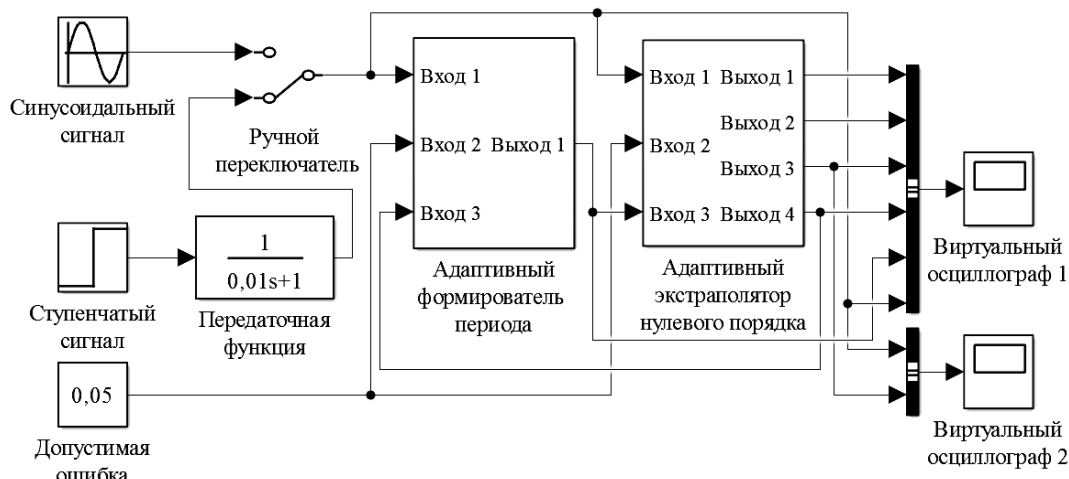


Рис. 1. Схема моделирования адаптивной ТИС с переменным тактом дискретизации

Модель основана на применении адаптивного преобразователя погрешности аппроксимации нулевого порядка, формирующего моменты времени дискретных выборок входного сигнала (блок «Адаптивный формирователь периода») – переменный такт дискретизации, и собственно предлагаемого адаптивного ЭНП с переменным тактом дискретизации (блок «Адаптивный экстраполятор нулевого порядка»).

Предполагается, что по соображениям точности можно задаваться предельной абсолютной или относительной допустимой погрешностью аппроксимации (блок «Допустимая ошибка»), причем в процессах контроля измеряемой переменной это значение можно менять.

В качестве тестовых воздействий в модели на рис. 1 рассматриваются либо переходный процесс апериодического звена первого порядка (блоки «Ступенчатый сигнал» и «Передаточная функция»), либо синусоидальное воздействие (блок «Синусоидальный сигнал»). Разумеется, в практических приложениях входное воздействие может представлять собой некоторый произвольно меняющийся во времени непрерывный или дискретный сигнал, например датчиков технологических параметров.

Заметим, что адаптивная ТИС (см. рис. 1) представляет собой замкнутую систему с контролем текущего значения базисной функции  $\bar{x}(t)$  (выходной сигнал блока «Адаптивный экстраполятор нулевого порядка» подан на вход отрицательной обратной связи блока «Адаптивный формирователь периода»).

На рис. 2 и 3 представлены модели блоков-подпрограмм «Адаптивный формирователь периода» и «Адаптивный экстраполятор нулевого порядка».

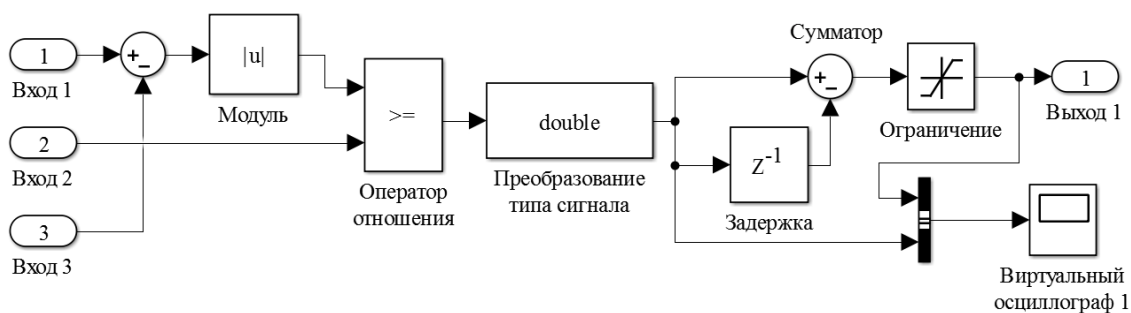


Рис. 2. Модель подпрограммы «Адаптивный формирователь периода»

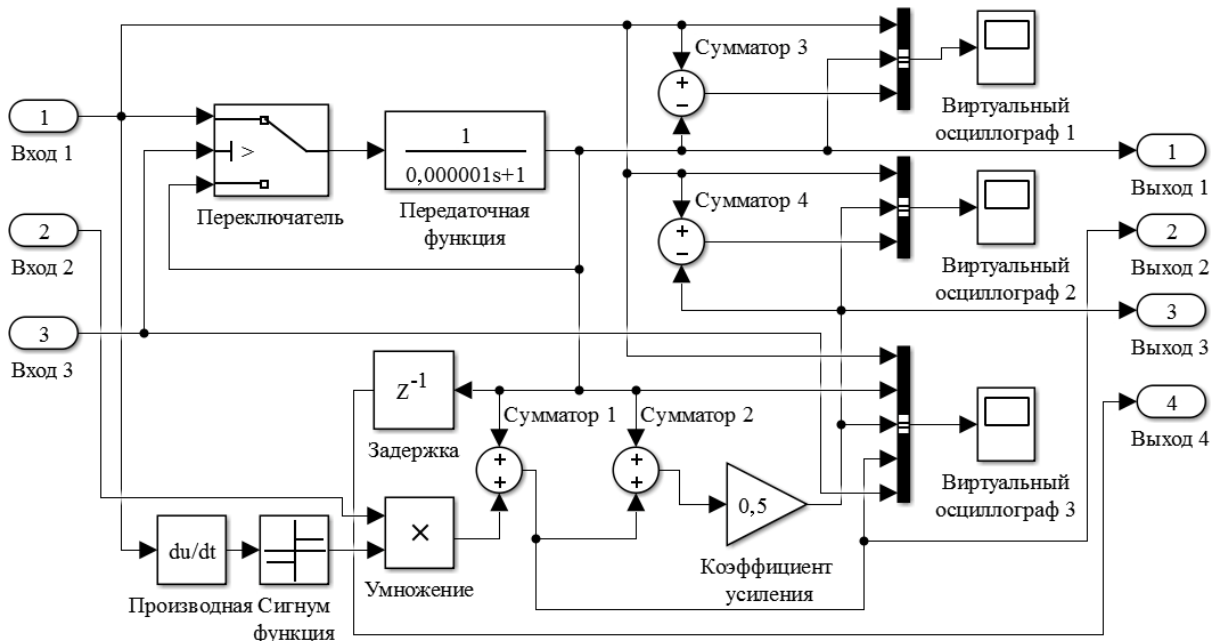


Рис. 3. Модель подпрограммы «Адаптивный экстраполятор нулевого порядка»

В адаптивном преобразователе погрешности аппроксимации «Адаптивный формирователь периода» осуществляется сравнение текущего значения измеряемой переменной с аппроксимированной переменной (базисной функцией) и формирование импульсов управления блоком «Адаптивный экстраполятор нулевого порядка» с переменным периодом дискретизации. В блоке «Адаптивный экстраполятор нулевого порядка» осуществляется выборка и хранение измеряемой переменной на основе модели аналогового УВХ (модули «Переключатель» и «Передаточная функция»). Время выборки и длительность импульса выборки в соответствии с параметрами рассматриваемой модели составляет порядка пяти микросекунд, т.е. пяти постоянным времени зарядки конденсатора УВХ. В

этом же блоке реализована возможность формирования сигнала ЭНП с временным опережением сигнала базисной функции на половину переменного такта дискретизации (модули «Производная», «Сигнум функция», «Умножение», «Задержка», сумматоры «Сумматор 1» и «Сумматор 2»).

Следует отметить, что не представляет труда штатными средствами библиотеки пакета Simulink смоделировать выборку-хранение входной дискретной информации в цифровом регистре данных [9–12], а не аналоговой информации с применением конденсатора УВХ (на выходе апериодического звена «Передаточная функция», см. рис. 3), что позволит существенно снизить время выборки.

**Результаты моделирования работы адаптивного ЭНП.** На рис. 4 приведены три отклика модели адаптивного ЭНП (см. рис. 3) на апериодическое входное воздействие, фиксируемых виртуальным осциллографом «Виртуальный осциллограф 3»:

– на выходе УВХ с отставанием сигнала базисной функции от входного в среднем на половину переменного такта  $T_k$  дискретизации (нижняя ступенчатая функция  $\bar{x}_1(t)$ ) (2):

$$\bar{x}_1(t) = x(T_k), \quad k = 0, 1, 2 \dots; \quad (2)$$

– на выходе сумматора «Сумматор 1» с опережением сигнала базисной функции от входного в среднем на половину переменного такта дискретизации (верхняя ступенчатая функция  $\bar{x}_2(t)$ ) (3):

$$\bar{x}_2(t) = x(T_k) + \varepsilon \operatorname{sign}(\dot{x}(T_k)), \quad (3)$$

где  $\dot{x}(T_k)$  – оценка первой производной входного сигнала в момент выборки;

– на выходе масштабирующего усилителя «Коэффициент усиления» со средним нулевым временным сдвигом экстраполированного сигнала от входного сигнала (средняя ступенчатая функция  $\bar{x}_3(t)$ ) (4):

$$\bar{x}_3(t) = x(T_k) + 0,5 \varepsilon \operatorname{sign}(\dot{x}(T_k)). \quad (4)$$

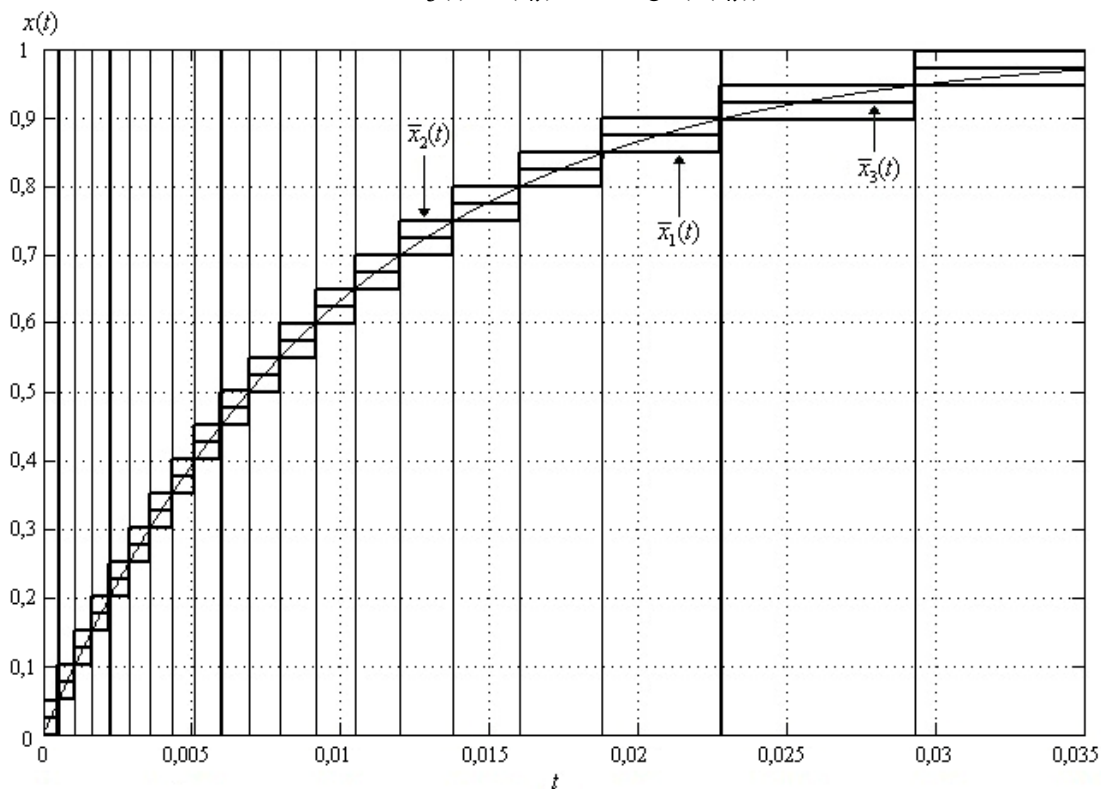


Рис. 4. Моделирование работы адаптивного экстраполятора нулевого порядка

Абсолютное допустимое отклонение  $\varepsilon$  базисной функции от исходного непрерывного сигнала при моделировании принято равным 0,05, т.е. 5% от заданного ступенчатого приращения входного сигнала. Заметим, что модуль ошибки экстраполяции для ступенчатой функции  $\bar{x}_3(t)$  не превышает 0,025, а следовательно, именно этот отклик экстраполятора целесообразно рассматривать в качестве сигнала базисной функции. При необходимости в процессе экстраполяции значение допустимой ошибки экстраполяции можно должным образом изменять.

В задачах управления технологическими процессами ЭНП с переменным тактом дискретизации позволяют сформировать нелинейное оптимальное управляющее воздействие на входе объекта, например, за счет формирования такого периода дискретизации, которое обеспечивало бы максимум быстродействия при заданном ограничении на величину управления [20–23].

**Заключение.** Рассмотрены вопросы применения экстраполяторов нулевого порядка в адаптивных информационно-управляющих системах и их моделирования в среде MatLab/Simulink. Применение переменного такта дискретизации адаптивных экстраполяторов позволяет решить сразу несколько задач:

- повысить эффективность ТИС при больших потоках измерительной информации за счет увеличения такта дискретной передачи информации при незначительных изменениях входных сигналов;
- повысить помехозащищенность измерительных каналов за счет сужения полосы частот сигналов и, соответственно, улучшить метрологические характеристики ТИС;
- сократить машинное время микропроцессорных контроллеров при обработке дискретной информации за счет сокращения ее избыточности;
- реализовать оптимальные по ряду критериев процессы нелинейного управления производственными установками.

Результаты исследований могут быть положены в основу синтеза и анализа цифроаналоговых адаптивных систем контроля и управления с переменным тактом дискретизации.

#### *Литература*

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
2. Адаптивные телеизмерительные системы / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, С.Н. Долинов, Л.Г. Журавин, Е.И. Семенов, А.В. Фремке; Под ред. А.В. Фремке. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
3. Авдеев Б.Я. Практический метод определения интервалов адаптивной дискретизации / Б.Я. Авдеев, С.Н. Долинов, Е.И. Семенов // Изв. вузов. Приборостроение. – 1979. – № 2. – С 9–13.
4. Руденко В.В. О погрешности интерполирования сигнала в системах с адаптивной дискретизацией // Отбор и передача информации. – 1972. – № 31. – С. 38–43.
5. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
6. Кириллов С.Н. Цифровые системы обработки речевых сигналов: учеб. пособие / С.Н. Кириллов, Д.Н. Стукалов. – Рязань: РГРТА, 1995. – 68 с.
7. Сергеев В.В. Метод сжатия видеоданных с использованием критерия равномерного приближения // Вопросы кибернетики. Кодирование и передача информации в вычислительных сетях. – 1978. – № 11. – С. 146–149.
8. Сжатие данных при телеизмерениях / Ю.Б. Ольховский, О.Н. Новоселов, А.П. Мановцев; Под ред. В.В. Чернова. – М.: Сов. радио, 1971. – 304 с.
9. Хоровиц П. Искусство схемотехники: в 3 т. – Т. 2. Пер. с англ. – 4-е изд., перераб. и доп. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир, 1993. – 371 с.
10. Федерков Б.Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б.Г. Федерков, В.А. Телец. – М.: Энергоиздат, 1990. – 320 с.
11. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
12. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров / Под ред. А. Марцинкявичюса. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
13. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 911 с.
14. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учеб. для вузов / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. – М.: Изд-во «Лань», 2011. – 464 с.
15. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: Корона-Век, 2014. – 368 с.
16. Смит Д.Н. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.

17. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
18. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп: пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
19. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
20. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
21. Борцов Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
22. Пшихопов В.Х. Оптимальное по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами // Изв. вузов. Электромеханика. – 2007. – № 1. – С. 51–57.
23. Казанцев В.П. Синтез дискретно-непрерывных систем управления электроприводами с упругими связями / В.П. Казанцев, Д.А. Даденков // Электротехника. – 2012. – № 11. – С. 24а–28.

---

**Казанцев Владимир Петрович**

Профессор каф. микропроцессорных средств автоматизации (МСА)  
Пермского национального исследовательского политехнического университета  
Тел.: 8 (342-2) 39-18-22  
Эл. почта: kvppgtu@mail.ru

**Хорошев Николай Иванович**

Доцент каф. МСА  
Тел.: 8 (342-2) 39-18-22  
Эл. почта: horoshevni@mail.ru

Kazantsev V.P., Khoroshev N.I.

**Adaptive zero-order hold devices with variable quantization step time in adaptive information management system**

The problems of Zero-order hold devices as part of the adaptive measuring and discrete-continuous process control systems are considered. It is shown that depending on the input signal properties (increment value and speed) the modification in a certain way of quantization step time is suitable for maintaining a desired accuracy of approximation or implementation high-speed limit performance of extrapolator. The model of Zero-order hold devices with variable quantization step time is offered because in the common integrated environments of scientific and engineering computing (MatLab/Simulink, Octave and others) are lacking the ways to study adaptive measuring and control systems in the conditions of quantization step time change. The results of modeling in MatLab/Simulink, which can be the basis for the synthesis and analysis of adaptive measuring and control systems, are presented.

**Keywords:** Zero-order hold device, quantization, measuring system, control system, adaptation, simulation.