

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.5.08

DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-1

Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова, Д. И. Нефедьев

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАТОРОВ

B. V. Chuvykin, I. A. Dolgova, I. A. Sidorova, D. I. Nefediev

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF ENGINEERING CALCULATION TIME CONSTANTS OF ANALOG INTEGRATORS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. При проектировании интегрирующих измерительных преобразователей, относящихся к классу нелинейных динамических систем, актуальны вопросы инженерного расчета постоянных времени аналоговых интеграторов при переходе на другую элементную базу с сохранением динамических характеристик прототипа при решении задачи импортозамещения. **Материалы и методы.** Используется известный принцип заимствования достижений из смежных научных областей, основанный на общности математических моделей. **Результаты.** Предложена инженерная методика расчета постоянных времени интегрирующих измерительных преобразователей, реализованных на аналоговых интеграторах. **Выводы.** Методика позволяет существенно расширить область поиска новых технических решений и получить максимальный технический эффект при практическом использовании интегрирующих измерительных преобразователей на аналоговых интеграторах в составе высокоточных интегрирующих аналого-цифровых преобразователей для решения сложных инженерных задач.

A b s t r a c t. Background. Problems of engineering calculation of time constants of analog integrators are actual in the design of integrating measuring converters belonging to the class of nonlinear dynamic systems in the transition on another element base, preserving dynamic characteristics of the prototype in solving the problem of import substitution. **Materials and methods.** The effective method of the analysis and transfer of achievements from adjacent areas based on a mathematical models is applied. **Results.** The proposed engineering method of calculating the time constants of the integrating measuring converters implemented with analog integrators. **Conclusions.** The method allows to significantly expand the scope of search for new technical solutions and to obtain maximum effect in the practical use of integrating measuring converters with analog integrators composed of a precision integrating analog-to-digital converters to solve complex engineering problems.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интегрирующий измерительный преобразователь, высокоточный интегрирующий аналого-цифровой преобразователь, нелинейность, сигма-дельта

модулятор, сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь, системы детерминированного хаоса.

Key words: integrating measuring converters, precision integrating analog-to-digital converter, nonlinearity, sigma-delta modulator, sigma-delta analog-to-digital converter, systems of the determined chaos.

Введение

В настоящее время существует потребность пополнения отечественной электронной компонентной базы высокоточными интегрирующими аналого-цифровыми преобразователями (ИАЦП), обеспечивающими эффективную разрядность 14 и более бит. Многие выпускаемые серийно и специализированные высокоточные сигма-дельта модуляторы (СДМ) и сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи (СДАЦП) на дискретных интеграторах имеют узкий диапазон рабочих частот (не более десятков кГц) и значительную потребляемую мощность (более 100 мВт) [1]. Кроме того, принципиальные особенности реализации наилучших по совокупности характеристик СДМ и СДАЦП данного класса, а также методы и средства их проектирования обычно не публикуются в открытой печати и отсутствуют в свободном доступе, что ограничивает возможные варианты их применения.

Анализ публикаций зарубежных и отечественных авторов показал, что недостаточное внимание уделяется анализу и реализации возможностей снижения энергопотребления ИАЦП за счет перехода к другой структуре и к другой технологии при сохранении динамических характеристик. Такие решения обладают значительными возможностями с точки зрения построения маломощных высокоточных ИАЦП.

Применение метода переноса достижений из смежных научных областей

На основе анализа характеристик выпускаемых СДМ и СДАЦП сделан вывод, что в СДАЦП требования на характеристики блоков аналоговой части достаточно жесткие [2]. Наибольшей потребляемой мощностью обладают блоки интеграторов интегрирующего измерительного преобразователя (ИИП), входящего в состав ИАЦП, независимо от выбранной структуры [3]. Это обусловлено необходимостью обеспечения большого коэффициента усиления во всей рабочей полосе частот и выходного тока, достаточного для заряда конденсаторов в цепях обратной связи [4]. Предлагается использовать современные достижения аналоговой электроники и заменить дискретные интеграторы на аналоговые. Такой переход позволит повысить помехоустойчивость, снизить энергопотребление или сохранить известные динамические характеристики прототипа на другой элементной базе для решения задачи импортозамещения.

На примере расчета ИИП второго порядка на аналоговых интеграторах в форме методики показано, как использовать известный метод переноса достижений из смежных научных областей для расчета численных значений постоянных времени интеграторов, если в качестве прототипа используются известные структурно-алгоритмические решения СДМ на дискретных интеграторах. При этом обеспечивается полное совпадение динамических характеристик аналогового варианта ИИП с динамическими характеристиками дискретного варианта ИИП с точностью, ограниченной инструментальными погрешностями [5].

В основу расчета положен метод, заимствованный из теории цифровой фильтрации, который описан в литературе [6] как метод инвариантного преобразования импульсной характеристики, где в качестве импульсной характеристики рассчитываемого цифрового фильтра используется дискретизированная импульсная характеристика соответствующего аналогового фильтра. В результате частотная характеристика цифрового фильтра образуется путем наложения частотной характеристики дискретизированного аналогового фильтра. Совпадение импульсных характеристик цифрового и аналогового фильтра в дискретном пространстве времени обеспечивает перенос (сохранение) всех частотно-временных характеристик. Применительно к нашей задаче использование метода инвариантного преобразования заключается в решении обратной задачи, т.е. в качестве аналога выбирается дискретный (цифровой вариант) интегратор, а конечным результатом является аналоговый вариант ИИП (на аналоговых интеграторах).

Методика инженерного расчета постоянных времени аналоговых интеграторов

Найдем значения постоянных времени аналоговых интеграторов по предложенной методике инженерного расчета на примере варианта ИИП второго порядка, для которых в качестве аналога по динамическим характеристикам используется вариант ИИП на дискретных интеграторах.

Интегрирующее звено второго порядка для варианта аналоговых интеграторов приведено на рис. 1,а. Для упрощения на рис. 1,б на дискретных интеграторах не изображены коммутируемые ключи.

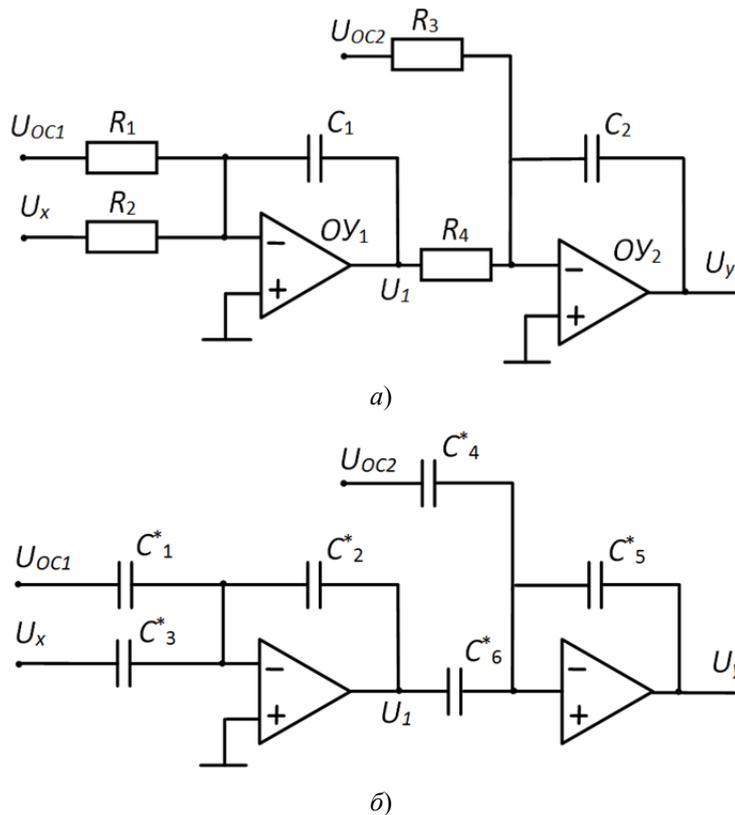


Рис. 1. Схемы интегрирующего звена второго порядка:
а – на аналоговых; б – на дискретных интеграторах

Результат преобразования за один цикл работы интегрирующего звена второго порядка на аналоговых интеграторах будет выражаться как

$$\begin{cases} U_y = U_x \frac{h^2}{R_2 R_4 C_1 C_2} + U_{oc1} \frac{h^2}{R_1 R_4 C_1 C_2} - U_1 \frac{h}{R_4 C_2} - U_{oc2} \frac{h}{R_3 C_2}, \\ U_1 = - \left(U_x \frac{h}{R_2 C_1} + U_{oc1} \frac{h}{R_1 C_1} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Результат преобразования за один цикл работы интегрирующего звена второго порядка на дискретных интеграторах будет выражаться как

$$\begin{cases} U_y = - \left(U_1 \frac{C_6^*}{C_5^*} + U_{oc2} \frac{C_4^*}{C_5^*} \right), \\ U_1 = - \left(U_x \frac{C_3^*}{C_2^*} + U_{oc1} \frac{C_1^*}{C_2^*} \right). \end{cases} \quad (2)$$

Для дальнейшего расчета коэффициенты системы уравнений (1) и (2) должны быть равны, поэтому из первого уравнения системы уравнений (1) необходимо исключить U_x и U_{OC1} . Добавим в рис. 1,а дополнительные связи с резисторами R_5 и R_6 , которые скомпенсируют влияние U_x и U_{OC1} . Тогда результат преобразования будет выражаться как

$$\begin{cases} U_y = U_x \frac{h^2}{R_2 R_4 C_1 C_2} + U_{OC1} \frac{h^2}{R_1 R_4 C_1 C_2} - U_1 \frac{h}{R_4 C_2} - U_{OC2} \frac{h}{R_3 C_2} - U_{OC1} \frac{h}{R_5 C_2} - U_x \frac{h}{R_6 C_2}, \\ U_1 = - \left(U_x \frac{h}{R_2 C_1} + U_{OC1} \frac{h}{R_1 C_1} \right). \end{cases} \quad (3)$$

В ходе преобразования (1) в (3) получим условия

$$\begin{cases} \frac{h^2}{R_2 R_4 C_1 C_2} = \frac{h}{R_6 C_2}, \\ \frac{h^2}{R_1 R_4 C_1 C_2} = \frac{h}{R_5 C_2}. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{R_2 R_4 C_1}{h R_6} = 1, \\ \frac{R_1 R_4 C_1}{h R_5} = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Путем пересчета значений коэффициентов из условия равенства систем уравнений (1) и (3) и условий (4) получим

$$\begin{cases} \frac{h}{R_2 C_1} = \frac{C_3^*}{C_2^*}, \\ \frac{h}{R_1 C_1} = \frac{C_1^*}{C_2^*}, \\ \frac{h}{R_4 C_2} = \frac{C_6^*}{C_5^*}, \\ \frac{h}{R_3 C_2} = \frac{C_4^*}{C_5^*}. \end{cases} = \begin{cases} R_2 C_1 = \frac{h C_2^*}{C_3^*}, \\ R_1 C_1 = \frac{h C_2^*}{C_1^*}, \\ R_4 C_2 = \frac{h C_5^*}{C_6^*}, \\ R_3 C_2 = \frac{h C_5^*}{C_4^*}. \end{cases} \quad (5)$$

Перейдем к новым переменным в (6), где τ_1 и τ_2 – постоянные времени первого интегратора, где τ_3 и τ_4 – постоянные времени второго интегратора:

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{h C_2^*}{C_3^*}, \\ \tau_2 = \frac{h C_2^*}{C_1^*}, \\ \tau_3 = \frac{h C_5^*}{C_6^*}, \\ \tau_4 = \frac{h C_5^*}{C_4^*}. \end{cases} \quad (6)$$

Проведено имитационное моделирование ИИП второго порядка с однобитным квантованием (реализует математическая функция Sign) в среде Matlab SIMULINK [7]. Ниже на рис. 2 приведены структуры ИИП второго порядка на аналоговых (обозначены Int на схеме) и на дискретных (обозначены Sum на схеме) интеграторах с пересчитанными постоянными времени интеграторов (на схеме tau) согласно формуле (6).

Из рис. 3 видно полное совпадение энергетических спектров выходных сигналов ИИП с дискретными (рис. 3,а) и с аналоговыми (рис. 3,б) интеграторами в структуре, что подтверждает корректность полученных формул и означает подобие динамических характеристик для идеальных элементов системы. Таким образом, в работе показано, что использование

предложенной методики позволяет во многих случаях преодолеть сложность математических расчетов, используя в качестве аналога известные варианты замкнутых нелинейных структур.

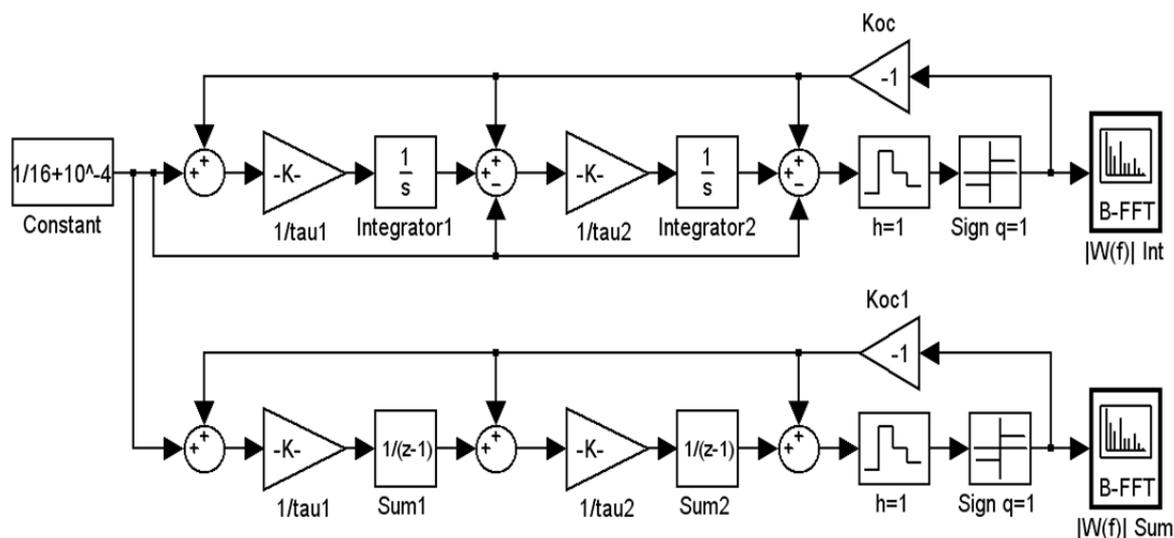


Рис. 2. Структуры ИИП второго порядка на аналоговых и дискретных интеграторах

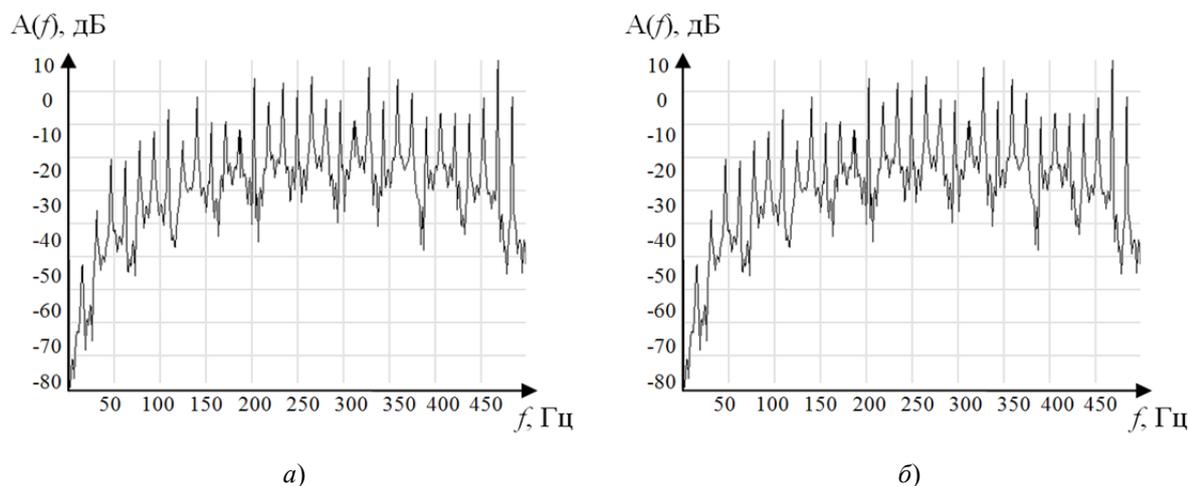


Рис. 3. Энергетические спектры ИИП второго порядка на:
а – аналоговых; б – дискретных интеграторах

Обобщая рассмотренный принцип переноса можно его распространить и на комбинированные структуры ИИП, состоящие из аналоговых и дискретных интеграторов. К примеру, можно использовать готовые микросхемы СДМ на дискретных интеграторах, на входе которых дополнительно подключены аналоговые интеграторы, охваченные общей обратной связью. Это особенно актуально для решения задачи повышения помехоустойчивости.

Заключение

Разработанная методика инженерного расчета постоянных времени при проектировании ИИП на аналоговых интеграторах позволила снизить энергопотребление за счет снижения требований к операционным усилителям по частотному диапазону и максимальной скорости нарастания выходного сигнала, что особенно важно для автономных беспроводных измерительных приборов и систем. Это свойство можно также использовать для увеличения быстродействия при сохранении тока потребления в рамках обменной функции «быстродействие – точность – энергопотребление» и повысить помехоустойчивость за счет использования аналоговых интеграторов в качестве фильтра нижних частот [8].

Библиографический список

1. Чувькин, Б. В. $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровые преобразователи: основы теории и проектирование : монография / Б. В. Чувькин, В. Н. Ашанин, Э. К. Шахов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009 – 188 с.
2. Ашанин, В. Н. Анализ состояния и тенденций производства интегральных преобразователей информации $\Sigma\Delta$ -архитектуры / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, А. А. Коротков, И. А. Сидорова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 26–35.
3. Васильев, В. А. Системный подход к совершенствованию измерительных преобразователей / В. А. Васильев, Н. В. Громков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 4. – С. 33–38.
4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 1983. – Т. 2. – 590 с.
5. Ашанин, В. Н. Анализ инструментальной составляющей погрешности однобитных $\Sigma\Delta$ -модуляторов / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков, Б. В. Чувькин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 52–61.
6. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
7. Чувькин, Б. В. Вопросы проектирования высокоточных сигма-дельта АЦП в составе информационно-измерительных систем / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3. – С. 39–45.
8. Schreier, R. Understanding delta-sigma data converters / R. Schreier, G. C. Temes. – New Jersey : IEEE Press, 2005. – 446 p.

Чувькин Борис Викторович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Chuvykin_BV@mail.ru

Chuvykin Boris Viktorovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Долгова Ирина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Dolgova_IA@mail.ru

Dolgova Irina Anatolevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сидорова Ирина Александровна

программист,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: irina-penza@mail.ru

Sidorova Irina Alexandrovna

programmer,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Nefediev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information-measuring
technique and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.5.08

Чувькин, Б. В.

Разработка методики инженерного расчета постоянных времени аналоговых интеграторов / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – №4 (22). – С. 7–13. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-1.