

УДК 681.3

Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЦИФРОАНАЛОГОВЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОММУТАТОРОВ ВЕСОВЫХ
ТОКОВ***

Рассматривается архитектура классического ЦАП, в которой предельная частота смены входного кода (частота обновления) ограничена, что обусловлено шунтирующим влиянием паразитного конденсатора, связанного с токовым выходом ЦАП. Ёмкость этого конденсатора, которая определяется ёмкостями p-n-переходов коллектор-база выходных транзисторов и ёмкостями на подложку в блоке коммутации весовых токов, во многих случаях не может быть уменьшена. Предлагается метод увеличения быстродействия ЦАП данного подкласса и снижения влияния выходного паразитного конденсатора ЦАП на время установления переходного процесса. Он заключается в подключении к токовому выходу ЦАП некоторой цепи коррекции динамических параметров с передаточной функцией $Sk(p)$, которая обеспечивает компенсацию вредного влияния выходного паразитного конденсатора. Приводятся основные схемы включения быстродействующих ЦАП. В качестве цепи коррекции динамических параметров предлагается схема на основе буферного повторителя напряжения, повторителя тока и специального корректирующего конденсатора C_k . Определяются условия применения предлагаемых схемотехнических решений. Рассматриваются результаты компьютерного моделирования – переходные характеристики ЦАП.

Цифроаналоговый преобразователь; квант тока; токовый выход; разрядность ЦАП; время установления; преобразователь «ток-напряжение»; операционный усилитель; усилитель напряжения; усилитель тока.

N.V. Butyrlagin, I.V. Pahomov, A.V. Bugakova

**THE METHOD OF INCREASE DIGITALANALOG CONVERTERS
ON THE BASIS OF SWITCHES WEIGHTED CURRENTS**

The architecture of the classical DAC, which limit the frequency of the change of the input code (refresh rate) limited, what determined to shunting the influence of parasitic capacitor associated with a current output DAC. The capacitance of this capacitor, which determined by the capacities of p-n junctions collector-base output transistors and capacitance on a substrate in the block switching weight currents, in many cases may not be reduced. Proposed a method of increase in performance DAC for this division and reducing the impact of the output parasitic capacitor DAC at the time of the establishment of the transitional process. It is connected to the current output DAC some circuit correction of dynamic parameters with transfer function $Sk(p)$, which provides the compensation of harmful influence of output parasitic capacitor. Provides the basic scheme and the inclusion of high-speed DAC. In the form of chain correction of dynamic parameters features of a scheme, which based on buffer voltage repeater, repeater current and special correction capacitor C_c . Defines the conditions of application of the proposed technical solutions. Discusses the results of computer simulation – transient performance DAC.

Digital-to-analog converter; the quantum of current; current output; bit DAC; settling time; converter "current-voltage"; operational amplifier; voltage amplifier; current amplifier.

* Подготовлено в рамках Госзадания № 2014/38–2014 г. Минобрнауки РФ.

Введение. В современных устройствах автоматики находят применение цифроаналоговые преобразователи, работа которых основана на коммутации и суммировании n -опорных (весовых) токов, изменяющихся по закону $2^n I_0$, где I_0 – квант тока, n – разрядность ЦАП [1, 2]. Дальнейшее повышение быстродействия таких ЦАП – одна из проблем современной микросхемотехники.

Существенный недостаток классического ЦАП (рис. 1) [1] состоит в том, что предельная частота смены его входного кода (частота обновления) сравнительно мала, что обусловлено шунтирующим влиянием емкости паразитного конденсатора C_1 , связанного с токовым выходом ЦАП. Для ряда современных ЦАП численное значение этой емкости достигает $20 \div 120$ пФ ($AD7520$ – $C_1=30 \div 120$ пФ, $AD565$ – $C_1=25$ пФ и т.п.) [1, 2].

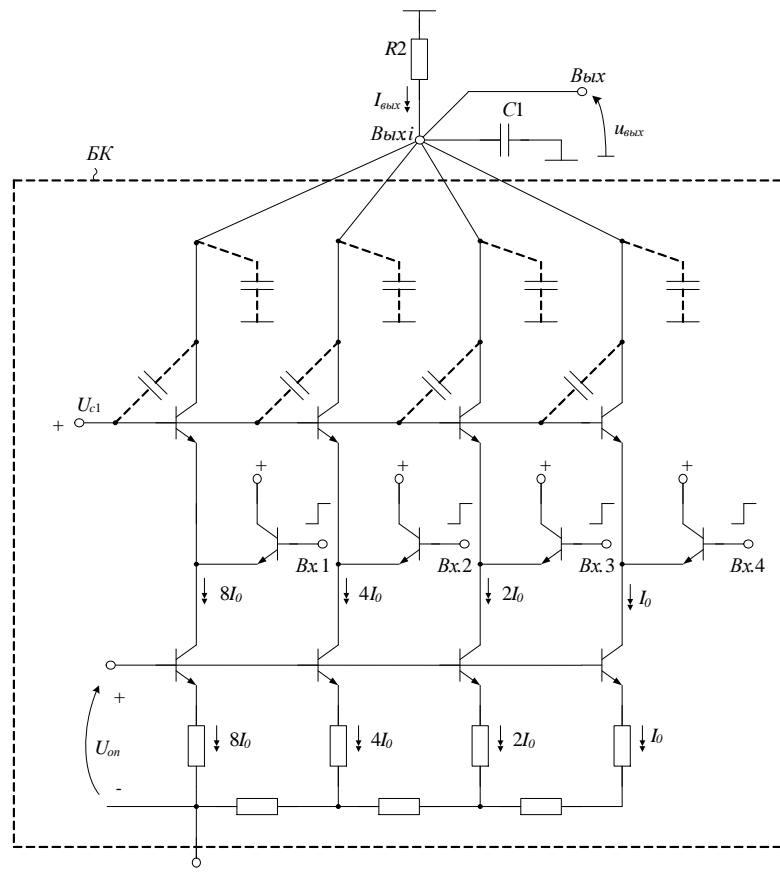


Рис. 1. Принципиальная схема классического ЦАП

На рис. 2 показаны результаты компьютерного моделирования переходных процессов выходного напряжения классического ЦАП (рис. 1) при разных значениях емкости паразитного конденсатора $C_1=5 \div 20$ пФ, сопротивлении эталонного резистора $R_2=2$ кОм и скачке выходного тока ЦАП $\Delta I=64$ мкА, обусловленного сменой входного кода.

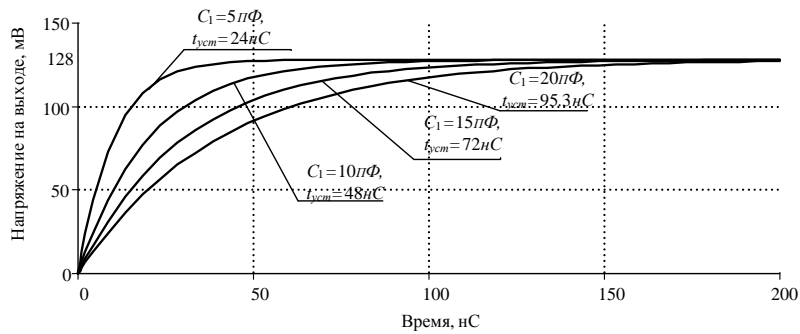


Рис. 2. Переходные процессы и время установления выходного напряжения классического ЦАП, представленного на рис. 1

Постановка задачи. При идеальных элементах коммутации весовых токов (K_1, K_2, \dots, K_4) максимальная частота смены входного кода ЦАП, представленного на рис. 1, являющаяся одним из его параметров, а также время установления переходного процесса ($t_{уст}$) выходного напряжения ЦАП не удовлетворяют многим применениям:

$$t_{уст} \approx 3C_1R_2, \quad (1)$$

где C_1 – емкость паразитного конденсатора C_1 ; R_2 – сопротивление эталонного резистора R_2 .

На рис. 3 приведена функциональная схема типового варианта включения ЦАП (см. рис. 1), в котором его токовый выход согласован с инвертирующим преобразователем «ток-напряжение» на основе операционного усилителя (OU_1). Данное схемотехническое решение широко используется в информационно-измерительной технике [2]. Однако для многих применений оно неэффективно из-за повышенных требований к быстродействию операционного усилителя [3], который имеет паразитную ёмкость C_1 в суммирующем входном узле, а также собственную ёмкость коррекции амплитудно-частотной характеристики. Это требует специальных схемотехнических решений в ОУ [4, 5, 6, 7], существенно сказывающихся на стоимости ЦАП и его энергопотреблении.

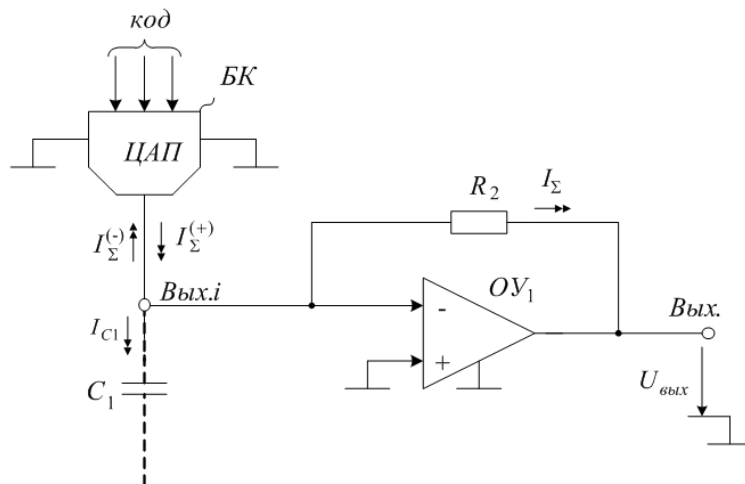


Рис. 3. Функциональная схема типового варианта включения ЦАП (см. рис. 1)

На рис. 4 представлены результаты компьютерного моделирования переходных процессов выходного напряжения ЦАП (рис. 3) при значении емкости паразитного конденсатора $C_1=20$ пФ, скачке выходного тока ЦАП $\Delta I=64$ мкА и емкости корректирующего конденсатора в структуре операционного усилителя ОУ, при отсутствии перерегулирования переходного процесса. При этом время установления переходного процесса равно $t_{уст}=210$ нс. Сравнение графиков на рис. 2 и 4 показывает, что известные схмотехнические решения ЦАП не обеспечивают высокого быстродействия – их время установления достаточно велико: $t_{уст} \geq 95 \div 210$ нс.

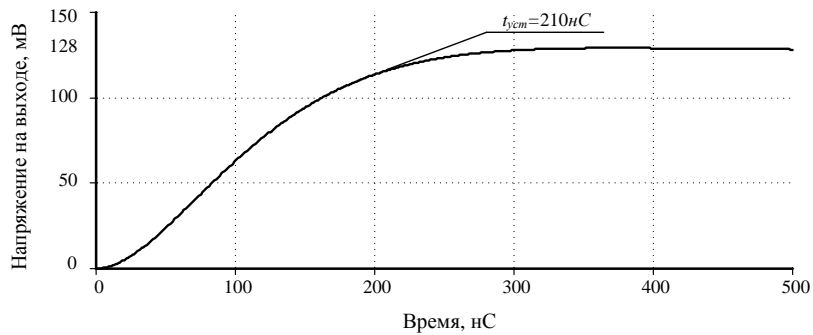


Рис. 4. Переходной процесс на выходе ЦАП (см. рис. 3)

Рассматриваемый метод повышения быстродействия ЦАП (рис. 5) заключается в подключении к выходу («Вых») некоторой корректирующей цепи с передаточной функцией $S_k(p)$, которая обеспечивает компенсацию вредного влияния выходной паразитной емкости C_1 на динамические характеристики. В общем случае эквивалентная схема ЦАП с потенциальным выходом (рис. 5) характеризуется сопротивлением нагрузки (в изображениях по Лапласу): $Z_n(p) = U_{вых}(p) / I_n(p)$.

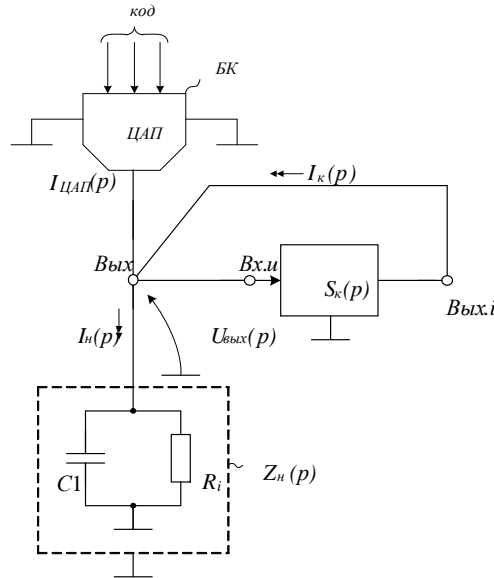


Рис. 5. Функциональная схема ЦАП с цепью коррекции

Примем, что быстродействие ЦАП характеризуется желаемым временем установления переходного процесса $t_{уст}^*$ при ступенчатом изменении выходного тока $I_{ЦАП}(p)$.

Таким образом, задача синтеза заключается, прежде всего, в определении математической модели цепи коррекции $S_k(p)$, при которой скорректированный ЦАП является устойчивым, а время установления переходного процесса $t_{уст}^*$ равно желаемому значению $t_{уст}^* \ll t_{уст}$, где $t_{уст}$ – время установления ЦАП без коррекции.

В качестве цепи динамической коррекции предлагается применить схему (рис. 6) [8] на основе буферного повторителя напряжения УН1, повторителя тока ПТ1 и ёмкости коррекции C_k , где

$$K_{УН1}(p) = U_{вых.и}^*(p) / U_{вых.и}(p), \quad K_{ПТ1}(p) = I_k(p) / I_{Ck}(p),$$

$$I_{Ck}(p) = C_k p U_{вых.и}(p). \quad (2)$$

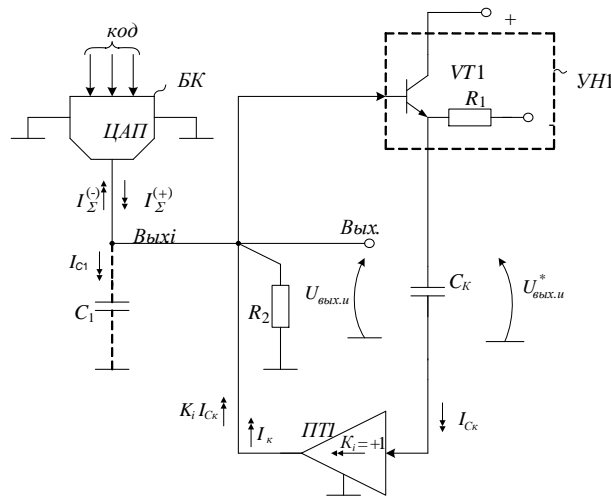


Рис. 6. Схема предлагаемого варианта включения ЦАП

Если буферный повторитель напряжения УН1 и повторитель тока ПТ1 являются безынерционными, т.е. их коэффициенты передачи $K_y(p) = K_y \approx 1$ и $K_i(p) = K_i \approx 1$, то передаточная функция данной цепи коррекции описывается выражением [9]

$$S_k(p) = C_k p. \quad (3)$$

Отсюда следует, что для получения высокого быстродействия рассматриваемого ЦАП необходимо, чтобы цепь коррекции была дифференцирующим элементом.

Таким образом, при $K_y(p) = 1$ и $K_i(p) = 1$ емкость корректирующего конденсатора C_k должна выбираться из условия [9]

$$C_k = C_1 - t_{уст}^* / 3R_i = C_1 (1 - t_{уст}^* / 3C_1 R_2). \quad (4)$$

Для получения минимального времени установления переходного процесса ($t_{уст}^* \ll t_{уст}$) при реализации цепи коррекции на основе безынерционных повторителей УН1 и ПТ1, которые, при необходимости, могут подключаться к схеме ЦАП через разделительные конденсаторы, необходимо иметь $C_K \approx C_1$.

Если требуется получить повышение быстродействия ЦАП в N_t – раз по сравнению со схемой без коррекции, где $N_t = t_{уст} / t_{уст}^*$, то емкость конденсатора C_K должна удовлетворять условию $C_K = (N_t - 1)C_1 N_t^{-1}$.

Предположение о том, что повторитель напряжения УН1 и повторитель тока ПТ1 являются безынерционными, значительно упрощает расчетные соотношения. Однако постоянные времени этих активных элементов схемы, даже очень малые, могут привести к возникновению колебательных переходных процессов [9].

Введение неинвертирующего усилителя напряжения УН1 и неинвертирующего усилителя тока ПТ1 качественно изменяет работу схемы ЦАП. Напряжение $U_{вых.и}$ передается на выход неинвертирующего повторителя напряжения УН1, что создает ток I_{C_K} через элемент частотной коррекции C_K . Данный ток поступает на вход неинвертирующего усилителя тока ПТ1 и создает дополнительный ток в выходной цепи ЦАП $I_{дон} = K_i I_{C_K}$, который способствует более быстрому перезаряду конденсатора C_1 . В конечном итоге это приводит к существенному уменьшению времени установления переходного процесса.

Если в качестве элемента частотной коррекции используется только конденсатор C_K , то для обеспечения работоспособности схемы необходимо выполнение условий:

$$C_K \approx C_1, C_K < C_1. \quad (5)$$

Можно достаточно строго аналитически показать [9], что схема, приведенная рис. 4, при выполнении условий (5) устойчива с учетом типовых инерционностей неинвертирующего усилителя напряжения УН1 и неинвертирующего усилителя тока ПТ1.

На рис. 7 приведены результаты компьютерного моделирования переходных процессов выходного напряжения предлагаемой схемы ЦАП (см. рис. 6) при емкости паразитного конденсатора $C_1=20$ пФ, сопротивлении эталонного резистора $R_2=R_1=2$ кОм, скачке выходного тока ЦАП $\Delta I=64$ мкА и разных значениях емкости корректирующего конденсатора в структуре элемента частотной коррекции $C_K=0 \div 19.5$ пФ.

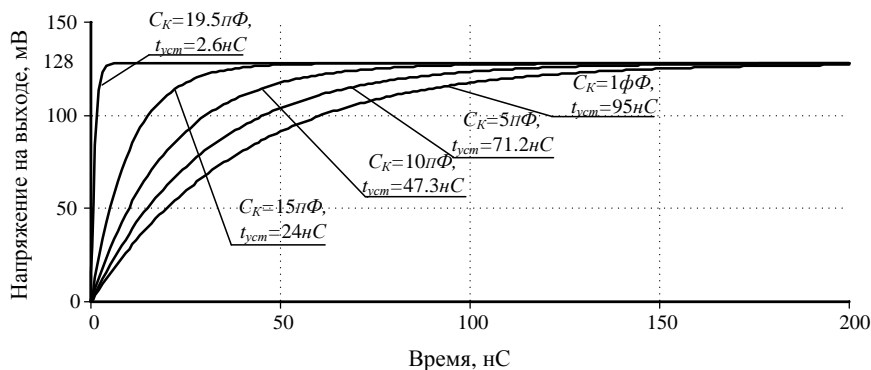


Рис. 7. Переходной процесс на выходе ЦАП (см. рис. 6)

Из данных графиков следует, что предлагаемое схемотехническое решение обеспечивает уменьшение времени установления переходного процесса выходного напряжения ЦАП, представленного на рис. 6 более чем в 30 раз – с 95 до 2,6 нС.

Заключение. Таким образом, разработанный метод повышения быстродействия ЦАП характеризуется существенными преимуществами в сравнении с классическим решением по времени установления переходного процесса выходного напряжения и частоте смены входного кода. В предлагаемой схеме [8] решена одна из задач повышения быстродействия цифроаналоговых преобразователей с коммутацией весовых токов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аналоговые интегральные схемы: Элементы, схемы, системы и применения / Под ред. Дж. Коннели. – М.: Мир, 1977. – 438 с.
2. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – 2-е изд., испр. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2007. – 528 с.
3. Карки Джим. Сопряжение операционных усилителей со скоростным ЦАП. Глава 1. ЦАП с токовым выходом // Компоненты и технологии. – 2010. – № 12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kit-e.ru/articles/dac/> /2010_12_111.php (дата обращения: 29.12.2013).
4. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С. Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей: Монография. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 231 с.
5. Prokopenko N.N. and Starchenko E.I. Method of rising the upper level frequency limit of wide-band amplifier // in 1st IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications, Proceedings, 2002. – P. 24-27.
6. Prokopenko N.N., Budyakov A.S., Savchenko E.M. and Korneev S.V. Maximum ratings of voltage feedback and current feedback operational amplifiers in linear and nonlinear modes // in Circuits and Systems for Communications, 2008. ECCSC 2008. 4th European Conference on, 2008. – P. 205-210.
7. Budyakov A., Schmalz K., Prokopenko N.N., Scheytt C. and Ostrovskyy P. “Design of bipolar differential opamps with unity gain bandwidth up to 23 GHz,” in Circuits and Systems for Communications, 2008. ECCSC 2008. 4th European Conference on, 2008. – P. 105-108.
8. Prokopenko N.N., Gaiduk A.R., Budyakov P.S., Butyrlagin N.V. Synthesis circuit correction for speed sensors of physical quantities and current-voltage converters with parasitic capacitance // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27-30, 2013. – P. 161-164.
9. Цифроаналоговый преобразователь; НОЗМ 1/36 / Прокопенко Н.Н., Пахомов И.В., Бутырлагин Н.В. – № 2013118970/08; заявл. 23.04.13 (536).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

Бутырлагин Николай Владимирович – Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ; e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; 346500, Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: +79034320799; кафедра информационные системы и радиотехника; аспирант.

Пахомов Илья Викторович – e-mail: pahom2191@mail.ru; тел.: +79094134744; кафедра информационные системы и радиотехника; аспирант.

Бугакова Анна Витальевна – e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; тел.: +79094169380; кафедра информационные системы и радиотехника; студентка.

Butyrlagin Nikolay Vladimirovich – Institute of service and business (branch) Don State Technical University; e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; 147, Shevchenko street, Shakhty, 346500, Russia; phone: +79034320799; the department information systems and radio engineering; postgraduate student.

Pahomov Il'ja Viktorovich – e-mail: pahom2191@mail.ru; phone: +79094134744; the department information systems and radio engineering; postgraduate student.

Bugakova Anna Vital'evna – e-mail: annabugakova.1992@mail.ru; phone: +79094169380; the department information systems and radio engineering; student.