

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук (ИППМ РАН)

Библиотека схемотехнических решений

Неинвертирующий CJFet буферный усилитель с токовым выходом
для работы при низких температурах: модификация НУ-1

Прокопенко Н.Н., prokopenko@sssu.ru,
Пахомов И.В., ilyavpakhomov@gmail.com,
Жук А.А., alexey.zhuk96@mail.ru

Научно-исследовательская лаборатория проблем проектирования в
экстремальной микроэлектронике ИППМ РАН и Донского государственного
технического университета (г. Ростов-на-Дону)

1. Составные транзисторы на комплементарных JFet

Составные транзисторы (СТ), которые содержат несколько элементарных транзисторов, в том числе с разными принципами работы, широко используются в качестве активного элемента в различных аналоговых устройствах (операционных усилителях, усилителях мощности, драйверах линий связи и т.п.), источниках электропитания и стабилизаторах напряжения.

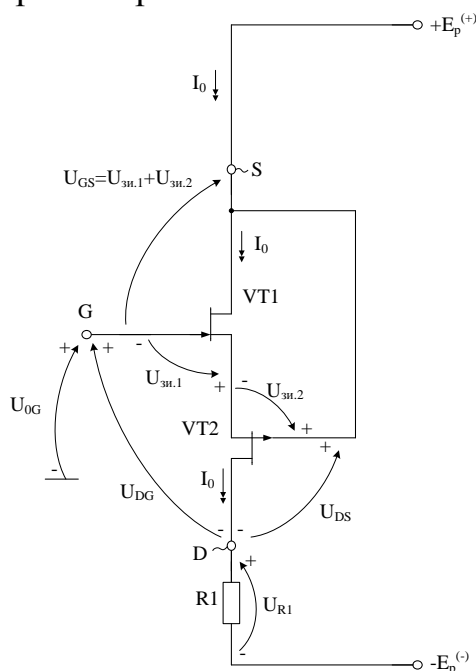


Рисунок 1 – Схема CJFet каскодного СТ [1]

Рассматриваемая в [1], структура СТ рис.1 имеет характерную зону закрытого состояния при напряжении затвор-исток, не превышающем его пороговое напряжение (U_n). При увеличении напряжения на эквивалентном затворе (G) СТ переходит в активный режим и может использоваться в задачах аналогового усиления сигналов.

СТ (рис. 1) по своим стоко-затворным характеристикам (рис. 2), подобен КМОП полевому транзистору:

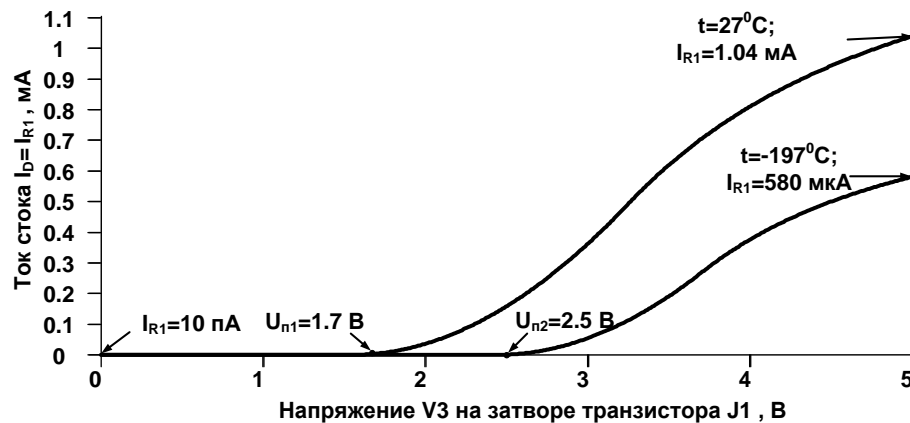


Рисунок 2 – Стоко-затворные характеристики СТ рис. 1 в среде LTspice при $t = 27^\circ\text{C}$, $t = -197^\circ\text{C}$ и напряжениях питания $E_{\text{п}} = \pm 5 \text{ V}$ на моделях JFET транзисторов, (г. Минск, МНИПИ, Беларусь).

Разработанный СТ (рис.1) существенно расширяет представления разработчиков аналоговых CJFet микросхем о методах построения усилительных трехполюсников. Он характеризуется новыми качествами. Это позволяет создавать нетрадиционные CJFet аналоговые IP-модули и микросхемы с улучшенными параметрами.

2. Неинвертирующий CJFet буферный усилитель с токовым выходом

Все существующие сегодня варианты построений буферных и неинвертирующих усилителей (НУ) на основе КМОП, КНИ, КНС, JFet, ВJT, SiGe и др. технологий можно разделить на два класса – схемы с низкоомным выходом [2-9] и схемы с высокоомным (токовым) выходом [10-20].

Особенность усилителей с высокоомным токовым выходом [10-20] состоит в том, что они обеспечивают опцию rail-to-rail (изменение уровня выходного напряжения от шины положительного питания до шины отрицательного питания). Кроме этого, усилители данного класса применяются для создания высокоимпедансных узлов, например, в схемах ОУ для обеспечения больших значений коэффициента усиления [21-22].

Предлагаемый в [23], неинвертирующий усилитель (НУ) с токовым выходом может использоваться в качестве устройства усиления аналоговых сигналов, в структуре аналоговых микросхем различного функционального назначения, например, операционных усилителях (ОУ), компараторах и т.п., в т.ч. работающих при низких температурах и воздействии проникающей радиации.

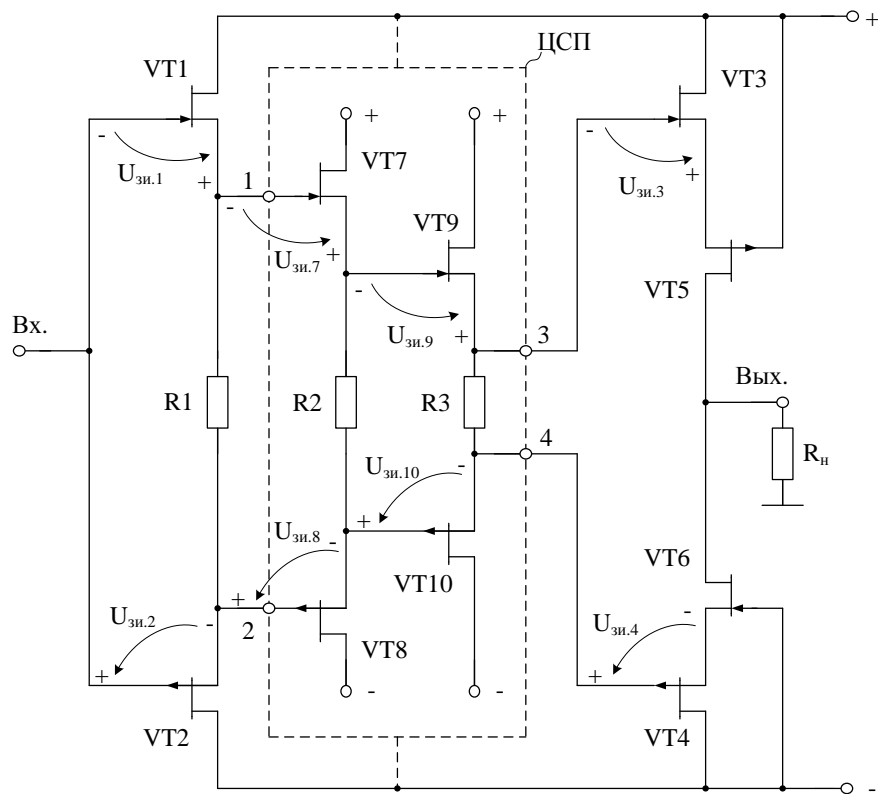


Рисунок 3 – Схема CJFet буферного НУ с токовым выходом

Схема рис.3 включает:

- входные полевые транзисторы (VT1, VT2) и токостабилизирующий двухполюсник (R1),
- дифференциальная цепь смещения потенциалов (VT7÷VT10, R2, R3),
- выходные полевые транзисторы (VT3÷VT6),
- двухполюсник, моделирующий свойства нагрузки (R_н).

При малых $u_{вх.}$ в данной схеме обеспечивается закрытое состояние транзисторов VT3, VT4, VT5, VT6, то есть нулевой сквозной ток между шинами источников питания.

При положительном приращении $u_{вх.}^{(+)}$, начиная с некоторого порогового напряжения ($U_{п}$) выходные полевые транзисторы VT3, VT5 входят в активный режим и обеспечивают положительное приращение ($i_{н}^{(+)}$) токов в нагрузке R_н.

При отрицательном приращении $u_{вх.}^{(-)}$ работают выходные полевые транзисторы VT4, VT6, создавая в нагрузке ток другого направления $i_{н}^{(-)}$.

Замечательная особенность схемы рис. 3 состоит в том, что при максимальном $u_{вх.}^{(+)}$, близком к напряжению на положительной шине источника питания, выходной полевой транзистор VT3 входит в режим насыщения. Как следствие, исток выходного полевого транзистора VT5 оказывается подключенным к положительной шине источника питания. При этом обеспечивается максимальный ток в нагрузке R_н:

$$i_{н}^{(+)} = I_{н.макс}^{(-)} \quad (1)$$

Если в схеме рис. 3 используются низкоомные нагрузки, то предлагаемые НУ рекомендуется использовать в качестве буферных усилителей с rail-to-rail токовым выходом.

Когда НУ рис. 3 применяется как промежуточный каскад ОУ, на его основе может быть создан высокоимпедансный узел в схеме ОУ, обеспечивающий большой коэффициент усиления по напряжению. При этом величина эквивалентного выходного сопротивления ($R_{\text{вых}}$) НУ, будет достигать уровня единиц-сотен мегаом:

$$R_{\text{вых}}^{-1} = Y_{\text{вых}} = S_5 \cdot \mu_5^{-1} + S_6 \cdot \mu_6^{-1}, \quad (2)$$

где S_5, S_6 - крутизна стоко-затворной характеристики полевых транзисторов VT5, VT6 в заданной рабочей точке; μ_5, μ_6 – коэффициенты внутренней обратной связи транзисторов VT5, VT6 ($\mu \approx 10^{-3} - 10^{-4}$), учитывающие влияние напряжения на стоке $U_{\text{зс}}$ на стоко-затворную характеристику ($\mu = \Delta U_{\text{зи}} / \Delta U_{\text{зс}}$, при $I_{\text{и}} = \text{const}$).

3. Компьютерное моделирование НУ с токовым выходом

В частном случае схема НУ рис. 3 исследовалась в среде LTspice IV на моделях библиотеки CJFet транзисторов Дворникова О.В. (МНИПИ, г. Минск, Беларусь).



Рисунок 4 – Графическое изображение полевых транзисторов с каналом n-типа (а) и p-типа (б) в среде LTspice.

На рис. 5 представлен статический режим оптимизированной схемы НУ рис. 1 в среде LTspice (Analog Devices, США) при напряжении питания $U_{\text{пит}} = \pm 5$ В, температуре $t = -197$ С, сопротивлениях $R_{\text{н}} = 100$ кОм, $R_1 = 14$ кОм; $R_2 = 4$ кОм; $R_3 = 60$ кОм и числе параллельно включенных элементарных транзисторов в структуре j-го составного транзистора: $N_2 = 1$; $N_4 = N_{10} = 15$; $N_5 = N_9 = 15$; $N_7 = 1$.

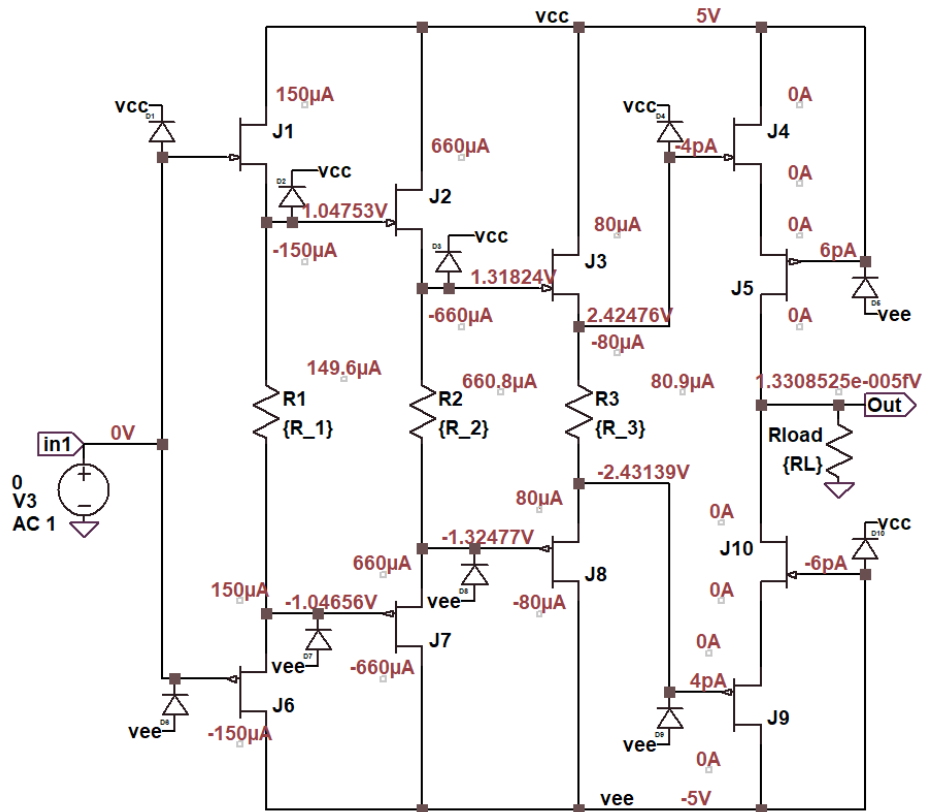


Рисунок 5 – Статический режим оптимизированного НУ рис. 3 в среде LTSpice

На рис. 6 приведена зависимость выходного напряжения НУ рис. 5 от входного напряжения (V_3) при напряжениях питания $U_{пит} = \pm 5$ В, сопротивлении нагрузки $R_H = 100$ кОм для температур $t = -197^\circ\text{C}$ и $t = 27^\circ\text{C}$. За счет рационального выбора схемы дифференциальной цепи смещения потенциалов (ЦСП), можно минимизировать зону нечувствительности на амплитудной характеристике НУ (рис. 6-7).

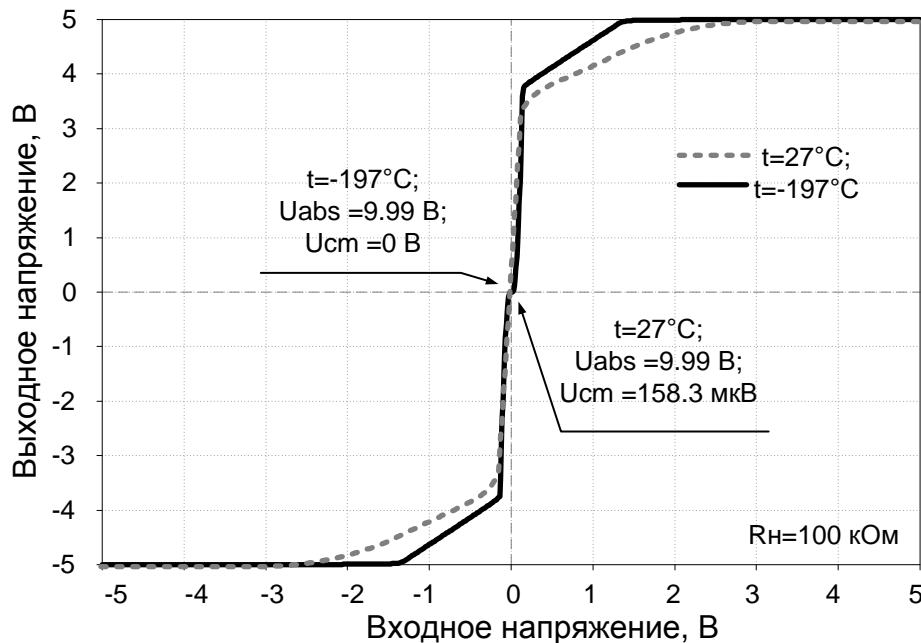


Рисунок 6 – Зависимость выходного напряжения НУ рис. 5 от входного напряжения при $R_H = 100$ кОм

На рис. 7 показана зависимость выходного напряжения НУ рис. 5 от входного напряжения (V_3) при напряжениях питания $U_{пит} = \pm 5$ В, сопротивлении нагрузки $R_H = 2$ кОм для температур $t = -197^\circ\text{C}$ и $t = 27^\circ\text{C}$.

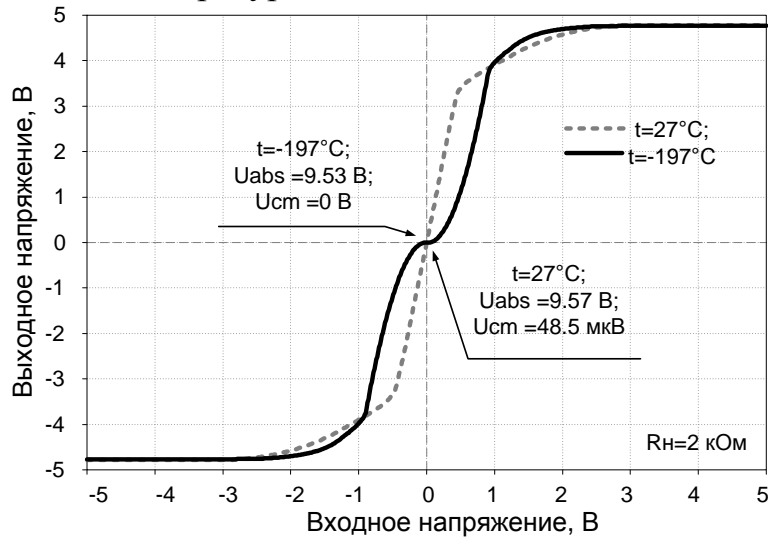


Рисунок 7 – Зависимость выходного напряжения НУ рис. 5 от входного напряжения при $R_H = 2$ кОм

Анализ амплитудных характеристик НУ (рис. 5), представленных на рис. 6 и рис. 7, показывает, что предлагаемая схема НУ обеспечивает изменение выходного напряжения от положительной шины источника питания, до отрицательной шины источника питания, т.е. реализует опцию rail-to-rail при изменении сопротивления нагрузки в широких пределах ($R_H = 2 \div 100$ кОм).

4. Параметры оптимизации НУ рис.1

Практический интерес представляет определение оптимальных значений сопротивлений нагрузки R_H , сопротивлений $R1 \div R3$, количества параллельно включенных полевых транзисторов $VT3$, $VT5$ и $VT4$, $VT6$ при заданных ограничениях на энергопотребление, диапазон изменения выходного напряжения, геометрию полевых транзисторов и т.п.

Моделирование проводилось на моделях JFET транзисторов, разработанных Дворниковым Олегом Владимировичем (г. Минск, МНИПИ, Беларусь oleg_dvornikov@tut.by).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

Список литературы

1. Пат. 2727704 Российская Федерация, МПК H03F 3/45. Составной транзистор на основе комплементарных полевых транзисторов с управляющим p-n переходом / Клейменкин Д.В., Титов А.Е., Жук А.А., Прокопенко Н.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический

университет». – № 2020105695/08; заявл. 06.02.2020; опубл. 23.07.2020, Бюл. № 21. – 16с.

2. Пат. 2393625 Российская Федерация, МПК H03F 3/26, 3/50, 1/30, Радиационно-стойкий буферный усилитель / Прокопенко Н.Н., Глушанин С.В., Будяков П.С.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ГОУ ВПО "ЮРГУЭС"). – № 2009110068/09; заявл. 19.03.2009; опубл. 26.06.2010, Бюл. № 18. – 13с.

3. Пат. 2523947 Российская Федерация, МПК H03F 3/00, Выходной каскад усилителя мощности на основе комплементарных транзисторов / Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Бутырлагин Н.В.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ГОУ ВПО "ЮРГУЭС"). – № 2013101657/08; заявл. 11.01.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. – 12с.

4. Пат. 2401509 Российская Федерация, МПК H03F 3/50, 3/26, Буферный усилитель / Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Серебряков А.И.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ГОУ ВПО "ЮРГУЭС"). – № 2009121193/09; заявл. 03.06.2009; опубл. 10.10.2010, Бюл. № 28. – 9с.

5. Пат. 2307456 Российская Федерация, МПК H03F 3/30, 3/26, Выходной каскад быстродействующего операционного усилителя / Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Крюков С.В.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ГОУ ВПО "ЮРГУЭС"). – № 2006106443/09; заявл. 01.03.2006; опубл. 27.09.2007, Бюл. № 27. – 9с.

6. Пат. 2409889 Российская Федерация, МПК H03F 3/50, 3/26, Буферный усилитель / Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Серебряков А.И.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ГОУ ВПО "ЮРГУЭС"). – № 2009123561/09; заявл. 19.06.2009; опубл. 20.01.2011, Бюл. № 2. – 11 pp.

7. Patent US 4791383, H03F 3/30, High speed current amplifier buffer circuit / Dennis M. Monticelli, Fremont; John W. Wright, Los Altos, both of Calif.; Assignee: National Semiconductor Corporation, Santa Clara, Calif.. – Appl. № 92,929; Filed. Sep. 4, 1987; publ. Dec. 13, 1988, 6 pp.

8. Patent US 6542032, H03F 3/45, Extremely linear, high speed, class AB rail to rail bipolar amplifier output stage with high output drive / Priscilla Escobar-Bowser,

Plano, TX ; Maria F. Carreto, Dallas, TX; Assignee: Texas Instruments Incorporated, Dallas, TX (US). – Appl. № 09/995,905; Filed. Nov. 28, 2001; publ. Apr. 1, 2003, 7 pp.

9. Patent US 5963065, H03F 3/30, Low offset push-pull amplifier / Roberto Alini, Pavia; Melchiorre Bruccoleri, Genova; Gaetano Cosentino, Catania; Valerio Pisati, Pavia, all of Italy; Assignee: SGS-Thomson Microelectronics S.r.L., Agrate Brianza, Consorzio per la Ricercasulla Microelettronica nel Attorney, Agent, or Firm Wolf, Greenfield & Sacks, P.C. Mezzogiorno, Catania, both of Italy. – Appl. № 08/787,301; Filed. Jan. 24, 1997; publ. Oct. 5, 1999, 9 pp.

10. Пат. 2292638 Российская Федерация, МПК H03F 3/45, Дифференциальный усилитель с повышенным ослаблением синфазного сигнала / Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Крюков С.В.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ГОУ ВПО "ЮРГУЭС"). – № 2005121174/09; заявл. 06.07.2005; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3. – 10с.

11. Пат. 2621287 Российская Федерация, МПК H03F 3/45, Мультидифференциальный операционный усилитель / Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Бугакова А.В., Пахомов И.В.; заявитель и патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ) – № 2015149773; заявл. 19.11.2015; опубл. 01.06.2017, Бюл. № 16. – 18с.

12. Пат. 2613842 Российская Федерация, МПК H03F 3/45, Дифференциальный операционный усилитель с малым напряжением питания / Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Пахомов И.В., Бугакова А.В.; заявитель и патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ) – № 2015145097; заявл. 19.11.2015; опубл. 21.03.2017, Бюл. № 9. – 24с.

13. Пат. 2337469 Российская Федерация, МПК H03F 3/26, 3/34, Двухтактный каскодный дифференциальный усилитель/ Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Сергеенко А.И.; заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ЮРГУЭС) – № 2007133471/09; заявл. 06.09.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30. – 10с.

14. Пат. 2313899 Российская Федерация, МПК H03F 3/30, 3/26, Выходной каскад усилителя мощности / Прокопенко Н.Н., Сергеенко А.И., Крюков В.В.; заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ЮРГУЭС) – № 2006109312/09; заявл. 23.03.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36. – 8с.

15. Пат. 2275736 Российская Федерация, МПК H03F 3/26, Выходной каскад усилителя мощности / Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Сергеев А.И.; заявитель и патентообладатель: ГОУ ВПО "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ЮРГУЭС) – № 2004134292/09; заявл. 24.11.2004; опубл. 27.04.2006, Бюл. № 12. – 15с.

16. Patent US 6956432, H03F 3/30, fig.1. Transmission output correcting apparatus / Eisuke Kobayashi, Yokohama; Kazuhide Yamada, Sendai ; Seiichi Yamaguchi, Yokohama; Assignee: Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Osaka (JP) – Appl. № 10/152,709; Filed. May 22, 2002; publ. Oct. 18, 2005, 17 pp.

17. Patent US 6037811, fig.1., H03F 3/27, Current-controlled output buffer / Ismail H. Ozguc, Sunnyvale, Calif.; Assignee: International Microcircuits, Milpitas, Calif. – Appl. № 09/097,886; Filed. Jun. 15, 1998; publ. Mar. 14, 2000, 8 pp.

18. Patent US 6265941, fig.3a H03F 3/30, Balanced differential amplifier having common mode feedback with kick-start / Douglas D. Lopata; Assignee: Agere Systems Guardian Corp., Electronic Circuit Design, An Engineering Approach, Orlando, FL (US) – Appl. № 09/438,770; Filed. Nov. 12, 1999; publ. Jul. 24, 2001, 10 pp.

19. Patent US 5734296, fig.1., H03F 3/30, Low voltage operational amplifier input stage and method / Robert N. Dotson Richard S. Griffith Robert L. Vyne; Assignee: Motorola, Inc., Schaumburg, Ill. – Appl. № 618,671; Filed. Mar 19, 1996; publ. Mar. 31, 1998, 14 pp.

20. Patent EP 1 500 189, fig.1., H03F 3/45, Operational amplifier with increased common mode input range / Blecker Eric B; Ranganathan Sumant; Assignee: Broadcom corp– Appl. № EP03723661A; Filed. 2003-02-27; publ. 2005-01-26, 23 pp.

21. Прокопенко Н.Н. Нелинейная активная коррекция в прецизионных аналоговых микросхемах (монография) // Ростов-на-Дону: Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы, 2000. 222с.

22. Операционные усилители с непосредственной связью каскадов: монография / Анисимов В.И., Капитонов М.В., Прокопенко Н.Н., Соколов Ю.М. - Л.: «Энергия», 1979. - 148 с.

23. Пат. 2710298 Российская Федерация, МПК H03F 3/00, Неинвертирующий усилитель с токовым выходом для работы при низких температурах / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Пахомов И.В.; заявитель и патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ) – № 2019126304; заявл. 21.08.2019; опубл. 25.12.2019, Бюл. № 36. – 18с.

24. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Прокопенко Н.Н. "Малощумящий электронный модуль обработки сигналов лавинных фотодиодов" Приборы и методы измерений, по. 2 (7), 2013, pp. 42-46.

25. O. V. Dvornikov, N. N. Prokopenko, N. V. Butyrlagin and I. V. Pakhomov, "The differential and differential difference operational amplifiers of sensor systems based on bipolar-field technological process AGAMC," 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, 2016, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491792

26. Дворников О. Чеховский В., Дятлов В., Прокопенко Н. Применение структурных кристаллов для создания интерфейсов датчиков //Современная электроника. – 2014. – №. 1. – С. 32-37.

27. O. V. Dvornikov, A. V. Bugakova, N. N. Prokopenko, V. L. Dziatlau and I. V. Pakhomov, "The microcircuits MH2XA010-02/03 for signal processing of optoelectronic sensors," 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2017, pp. 396-402. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981781