CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-60-68

УДК 621.382

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОДНОПОЛЯРНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ

О. В. ДВОРНИКОВ[1], В. А. ЧЕХОВСКИЙ[2]

[1]ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт» (Минск, Республика Беларусь)
[2]Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Инструментальные усилители, представляющие собой дифференциальные усилители напряжения с высоким сопротивлением по каждому входу и фиксированным значением коэффициента усиления, широко применяются в различной радиоэлектронной аппаратуре. Типовая реализация инструментальных усилителей путем соединений трех операционных усилителей не позволяет получить высокую стабильность коэффициента усиления напряжения в широком диапазоне входного синфазного сигнала, особенно при большом усилении. Для решения указанной проблемы были изучены конструктивно-схемотехнические особенности прецизионных инструментальных усилителей фирмы Analog Devices и на основе результатов выполненного анализа разработаны основные блоки микросхем инструментальных усилителей с однополярным напряжением питания на биполярных транзисторах и полевых транзисторах, управляемых *p-n*-переходом. В статье для всех блоков приведены электрические принципиальные схемы и результаты схемотехнического моделирования, показывающие возможность программирования различного сочетания параметров.

Ключевые слова: прецизионный инструментальный усилитель, полевой транзистор, *p-n*-переход, однополярное напряжение питания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дворников, О. В. Схемотехнический синтез инструментальных усилителей с однополярным напряжением питания / О. В. Дворников, В. А. Чеховский // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 60–68. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-60-68.

CIRCUIT SYNTHESIS OF INSTRUMENTATION AMPLIFIERS WITH A SINGLE SUPPLY VOLTAGE

OLEG DVORNIKOV[1], VLADIMIR TCHEKHOVSKI[2]

[1]OJSC "Minsk Research Instrument-Making Institute" (Minsk, Republic of Belarus)
[2]Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Instrumentation amplifiers, which are differential voltage amplifiers with high impedance at each input and a fixed gain, are widely used in various electronic equipment**.** The typical implementation of instrumentation amplifiers by connecting three operational amplifiers does not provide high voltage gain stability over a wide range of input common-mode signals, especially at high gain. To solve this problem, the design and circuitry features of precision instrumentation amplifiers from Analog Devices were studied. Based on the analysis results, the main blocks of instrumentation amplifier microcircuits with a single-supply voltage using bipolar transistors and junction field-effect transistors were developed. The article presents electrical schematic diagrams and circuit simulation results for all units, demonstrating the capability to program various combinations of parameters.

Keywords: precision instrumentation amplifier, field-effect transistor, p-n junction, single-polarity supply voltage.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Dvornikov O., Tchekhovski V. (2026) Circuit Synthesis of Instrumentation Amplifiers with a Single Supply Voltage. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 60–68. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-60-68 (in Russian).

Введение

В различных устройствах информационно-измерительной техники, экспериментальной физики, приборостроения широкое применение находят инструментальные усилители (ИУ), представляющие собой дифференциальные усилители с высоким сопротивлением по каждому входу и фиксированным значением коэффициента усиления напряжения, обычно в диапазоне от 1 до 1000, малочувствительным к изменению напряжения питания, температуры, уровню синфазного входного напряжения. Существующая на рынке потребность в ИУ объясняет обширную номенклатуру выпускаемых разными предприятиями микросхем ИУ, среди которых следует выделить около 70 изделий фирмы Analog Devices[1]. Особую популярность получили ИУ, допускающие применение одного источника питания (single-supply instrumentation amplifier) и обеспечивающие размах выходного напряжения, близкий к напряжению источника питания (rail-to-rail output instrumentation amplifier).

Возникшие в последнее время затруднения в приобретении разработчиками радиоэлектронной аппаратуры зарубежных микросхем, в том числе фирмы Analog Devices, стимулировали работы по развитию методов проектирования и малосерийного производства отечественных аналоговых микросхем для замены наиболее необходимых зарубежных изделий [1–3]. В том числе был разработан базовый кристалл для производства функциональных аналогов микросхем AD8244, AD8625, AD8220, WSH223 [3] на элементной базе технологического маршрута «40 В комплементарный биполярный с изоляцией *p-n*-переходом» ОАО «Интеграл». Апробация базового кристалла показала, что разработанные микросхемы очень близки по параметрам к AD8244, AD8625, WSH223. В то же время ИУ, реализованный по типовой схеме на трех операционных усилителях (ОУ) [4], существенно уступает по уровню статических параметров AD8220.

Цель исследований – совершенствование схемотехнического синтеза микросхем прецизионных ИУ с однополярным источником питания и размахом выходного напряжения, близким к напряжению источника питания (Rail-to-Rail, R-t-R).

Конструктивно-схемотехнические особенности прецизионных инструментальных усилителей

Анализ упрощенных электрических схем серии ИУ фирмы Analog Devices позволил установить, что все они базируются на модифицированной электрической схеме с тремя ОУ (рис. 1), впервые примененной в ИУ AD524.

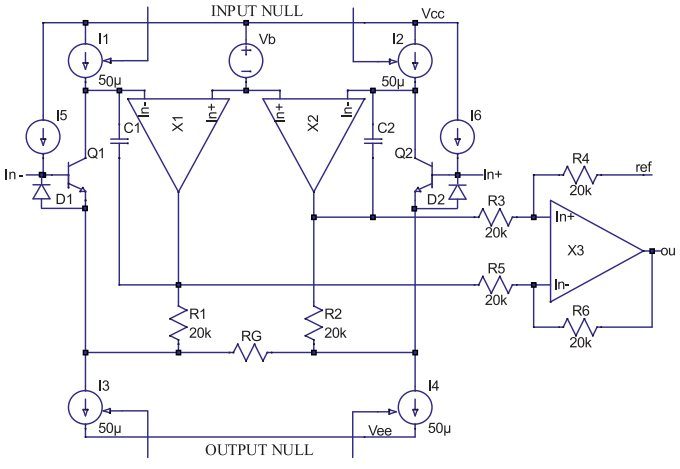


Рис. 1. Модифицированная электрическая схема инструментального усилителя
Fig. 1. Modified electrical circuit of an instrumentation amplifier

[1] Selection Table for Instrumentation Amplifiers [Electronic resource]. Mode of access: https://www.analog.com/en/product-category/instrumentation-amplifiers.html.

Главное отличие модифицированной электрической схемы ИУ от типовой состоит в применении входного предварительного усилителя (предусилителя) на транзисторах Q1 и Q2, который устанавливает требуемый коэффициент усиления напряжения ИУ с помощью обратной связи (ОС) на ОУ X1, R1 и X2, R2. Запрограммированное усиление K_V достигается путем изменения сопротивления RG, в то время как ОС обеспечивает постоянство токов коллекторов транзисторов Q1, Q2, одинаковое падение напряжения на их прямосмещенных эмиттерных переходах $V_{\text{BE1}} \approx V_{\text{BE2}}$ и, таким образом, обеспечивает зависимость напряжения на RG только от напряжения между входами *In*– и *In*+.

Коэффициент усиления определяется по формуле

$$K_V = 1 + g_M \left(\text{R1} + \text{R2}\right), \tag{1}$$

где g_M – крутизна входного предусилителя

$$g_M \approx \left(\text{RG} + \frac{\varphi_T}{I_{\text{C1}}} + \frac{\varphi_T}{I_{\text{C2}}} \right)^{-1}; \tag{2}$$

φ_T – температурный потенциал, $\varphi_T = kT/q$; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; I_{Ci} – коллекторный ток i-го транзистора.

Для типовых значений T = 300 K, $\varphi_T \approx 25$ мВ, $I_{\text{C}} = 50$ мкА величина $\varphi_T/I_{\text{C}} = 500$ Ом. Поэтому по мере уменьшения RG для увеличения требуемого коэффициента усиления K_V крутизна входного предусилителя возрастает до крутизны входных транзисторов, при этом:

– обеспечивается очень высокий коэффициент усиления с разомкнутой цепью ОС, порядка $3 \cdot 10^8$ при требуемом коэффициенте усиления 1000, тем самым уменьшая ошибки, связанные с усилением, до пренебрежимо малых;

– произведение коэффициента усиления на полосу пропускания, которое определяется конденсатором C1 или C2 и крутизной входного предусилителя, достигает 25 МГц;

– напряжение шумов на входе снижается до значения, определяемого током коллектора входных транзисторов, и спектральная плотность шума на частоте 1 кГц составляет для AD524 около 7 нВ/√Гц при $K_V = 1000$.

Заметим, что для минимизации температурной зависимости крутизны входного предусилителя источники тока I1, I2, I3, I4 на рис. 1 выполнены с выходным током, прямо пропорциональным абсолютной температуре (proportional-to-absolute-temperature, PTAT). К другим конструктивно-схемотехническим особенностям AD524 можно отнести перечисленные ниже.

1. Источники тока I1, I2, I3, I4 представляют собой биполярные транзисторы с эмиттерными резисторами, сопротивление которых может изменяться внешними потенциометрами для изменения отношения токов I1/I2, I3/I4 и позволяет компенсировать напряжение смещения нуля на входе (INPUT NULL) и выходе (OUTPUT NULL), что особенно важно при применении внешнего резистора RG.

2. Источники тока I5, I6 обеспечивают компенсацию входного тока ИУ.

3. Диоды D1, D2 применены для защиты эмиттерных переходов Q1, Q2 от пробоя при перегрузке входного каскада. Известно, что даже кратковременный пробой эмиттерного перехода *n-p-n*-транзистора приводит к уменьшению коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером β, которое зависит от величины тока пробоя I_{PR} и продолжительности его протекания. Для уменьшения I_{PR} обычно применяют токоограничительные резисторы, соединенные со входом, однако они увеличивают спектральную плотность напряжения шума. По указанной причине в качестве токоограничительных резисторов в AD524 применены специальные конструкции полевых транзисторов, управляемых *p-n*-переходом (ПТУП), обеспечивающие двунаправленное ограничение тока, тем самым защищая Q1, Q2 как от положительных, так и от отрицательных перегрузок. Двунаправленное ограничение поддерживает максимальный входной ток на уровне 3 мА в диапазоне 36 В.

4. В AD524 предусмотрены три вывода с возможностью выбора коэффициента усиления, равного 10, 100 и 1000. Сопротивления резисторов R1–R6 подгоняются лазером для согласования их отношения с точностью до ±0,01 %, что обеспечивает ослабление синфазных сигналов более чем на 80 дБ и точность усиления ±0,02 %.

5. Для обеспечения K_V =1000 требуется очень малое сопротивление резистора RG, около 40 Ом, а так как подстройка RG проводится при изменениях ИУ, выполняемых на полупровод-

никовой пластине, и на величину RG влияют сопротивления зондов и соединительных проводников, то это усиление достигается с меньшей точностью.

6. Особым преимуществом встроенных резисторов, задающих усиление, является то, что температурный коэффициент усиления при их применении зависит только от отношения сопротивлений аналогичных пленочных резисторов и составляет менее 10 ppm/°C для $K_V < 100$. Для $K_V = 1000$ температурный коэффициент усиления увеличивается до 25 ppm/°C из-за более значительного влияния сопротивления металлических проводников, последовательно соединенных с резистором в 40 Ом, задающим величину усиления.

7. Для исключения влияния входных токов ОУ X1–X3 на работу элементов предусилителя в этих ОУ применены входные ПТУП, режим работы которых задан источниками тока с малым температурным коэффициентом (около ±100 ppm/°C) для минимизации температурного дрейфа напряжения смещения нуля входных пар полевых транзисторов. Низкий дрейф особенно важен для выходного усилителя X3 и желателен для X1 и X2.

Дальнейшая модернизация ИУ фирмы Analog Devices была направлена на уменьшение их стоимости и улучшение эксплуатационных характеристик при минимальном изменении схемы рис. 1.

В ИУ выполнена защита всех выводов микросхем от воздействия электростатического разряда (ЭСР) включением защитных диодов и токоограничительных резисторов. Обычно защита от ЭСР гарантирована до 4 кВ (модель человеческого тела). Для уменьшения стоимости микросхем за счет снижения трудоемкости лазерной подстройки сопротивлений резисторов в большинстве ИУ реализованы только два высокоточных значения коэффициента усиления, причем $K_V = 1$ обеспечивается путем лазерной подгонки отношений резисторов R3/R4 и R5/R6 при отсутствии RG, а второе значение усиления – путем подгонки отношения (R1 + R2)/RG для небольшого K_V. Величина $K_V > 100$ обеспечивается выбором сопротивления внешнего резистора RG.

Разработаны двухканальные исполнения ИУ (AD8222) и прецизионные ИУ с дополнительными ОУ для обработки сигнала (AD8295). Применение в качестве X1 и X2 операционных усилителей с большим диапазоном допустимого выходного напряжения позволило удалить из схемы рис. 1 источники тока I3, I4 (AD8221, AD8222, AD8228, AD8295 и др.) и установить требуемый эмиттерный ток Q1, Q2 только за счет ОС на X1, R1 и X2, R2 с исключением возможности балансировки выходного напряжения смещения ИУ потенциометром между выводами OUTPUT NULL.

При разработке ИУ с одним источником питания также применялась схема рис. 1 с заменой типа проводимости биполярных транзисторов на противоположный, обеспечением допустимого уровня входного синфазного сигнала около нулевого значения и реализации R-t-R-выходного каскада. Проектирование R-t-R-выходных каскадов известно и рассмотрено в [5–7], а для сохранения работоспособности при нулевом входном синфазном напряжении и однополярном положительном питании перед предусилителем (рис. 1) обычно размещены входные повторители напряжения на *p*-*n*-*p*-транзисторах (AD8223, AD8226, AD8227) или ПТУП со встроенным каналом *n*-типа (AD8220, AD8224). ИУ с входными *p*-*n*-*p*-транзисторами работоспособны при меньшем напряжении питания, чем с входными *n*-ПТУП, и имеют существенно больший входной ток, наличие которого в некоторых применениях ИУ используют для проверки отсутствия повреждений в присоединительных цепях.

Основные блоки инструментальных усилителей с однополярным напряжением питания

На основе проведенного анализа ИУ, известных технических решений и имеющегося схемотехнического задела [3, 8, 9] на элементной базе технологического маршрута «40 В комплементарный биполярный с изоляцией *p*-*n*-переходом» ОАО «Интеграл» разработаны основные блоки, позволяющие синтезировать ИУ с однополярным напряжением питания и разным уровнем параметров, а именно:

– предварительный усилитель и входные повторители напряжения на *n*-ПТУП J7, J8 (рис. 2) и *p*-*n*-*p*-транзисторах;

– блок смещения, генерирующий выходной ток PTAT-типа, протекающий через резисторы R8, R9, R10, и выходной ток с малым температурным коэффициентом через R2 (рис. 3);

– схема ОУ (рис. 4) с R-t-R-выходным каскадом, допустимым отрицательным уровнем входного синфазного сигнала при однополярном напряжении питания и возможностью программирования параметров ОУ изменением сопротивления резистора R22 (рис. 4).

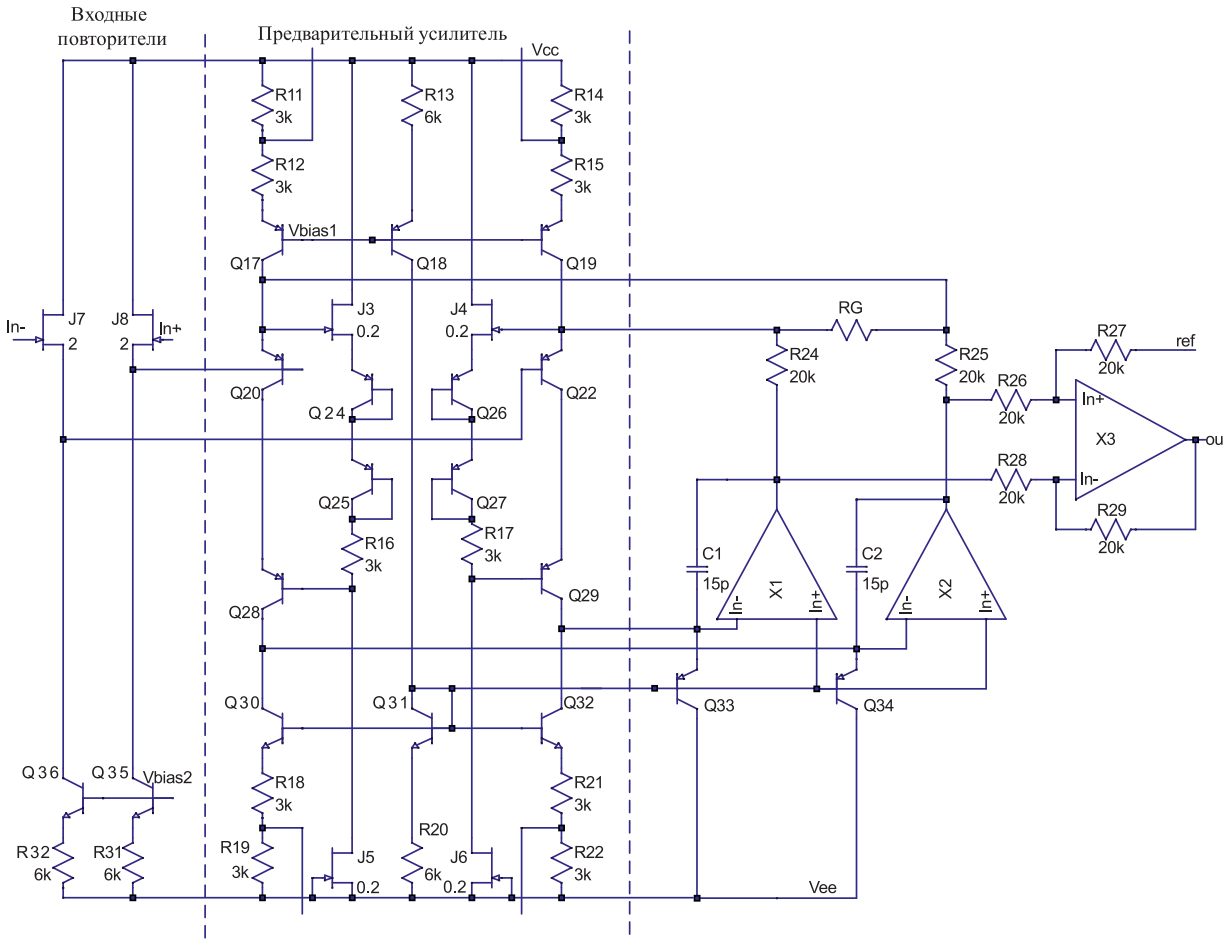
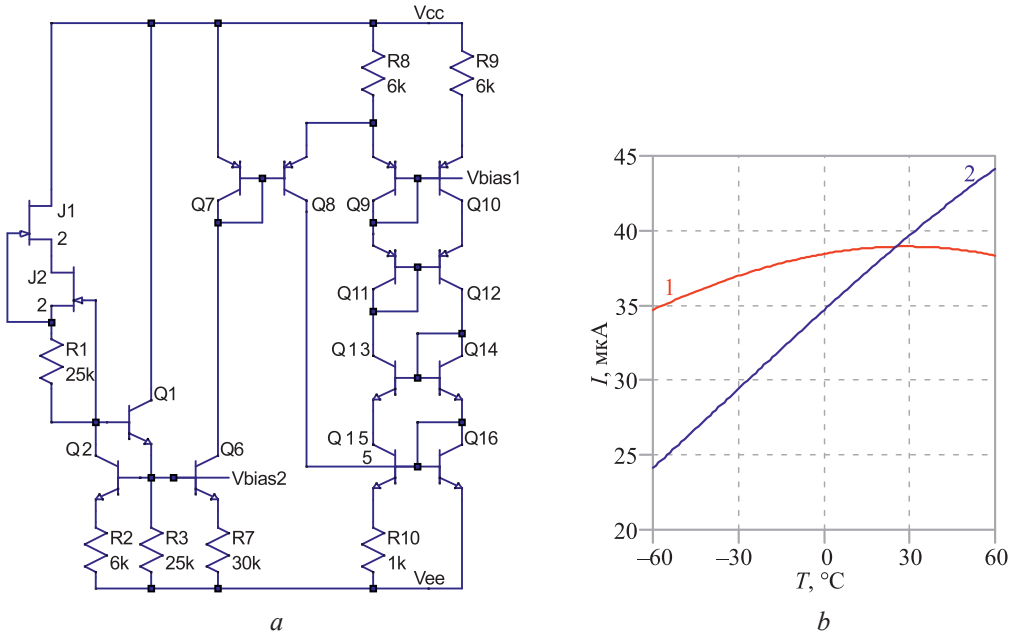


Рис. 2. Инструментальный усилитель с выделенными блоками предварительного усилителя и входными повторителями напряжения
Fig. 2. Instrumentation amplifier with distinct preamplifier stages and input voltage followers



a *b*

Рис. 3. Блок смещения: *a* – электрическая схема; *b* – температурная зависимость токов; 1, 2 – ток через резисторы R2 и R10 соответственно
Fig. 3. Bias block: *a* – electrical circuit; *b* – temperature dependence of currents; 1, 2 – current through resistors R2 and R10, respectively

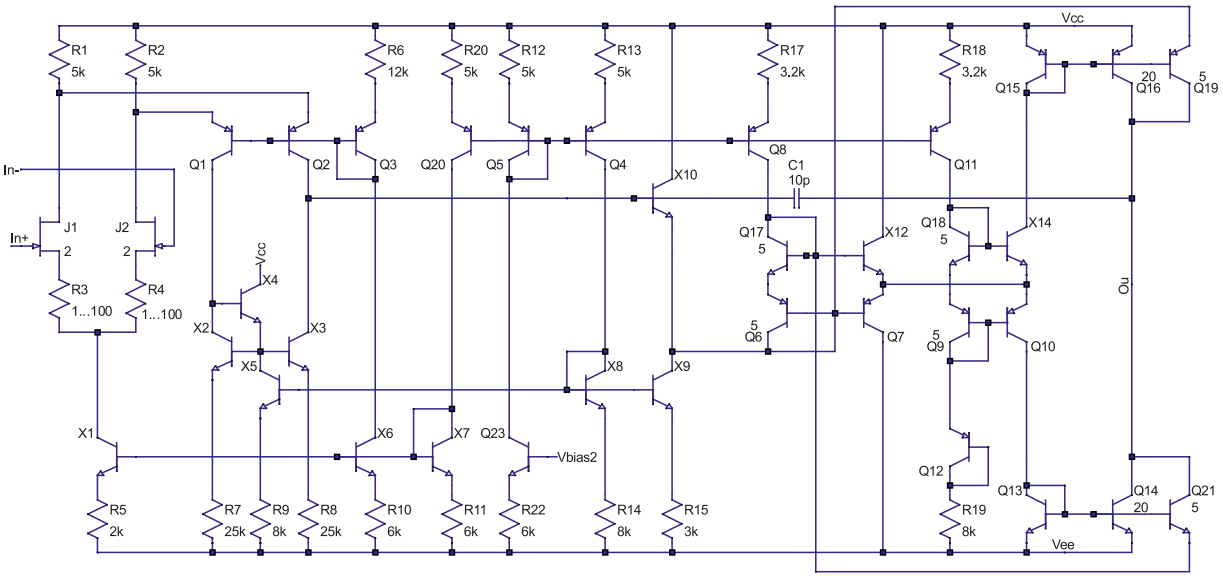


Рис. 4. Электрическая схема операционного усилителя
Fig. 4. Electrical circuit of the operational amplifier

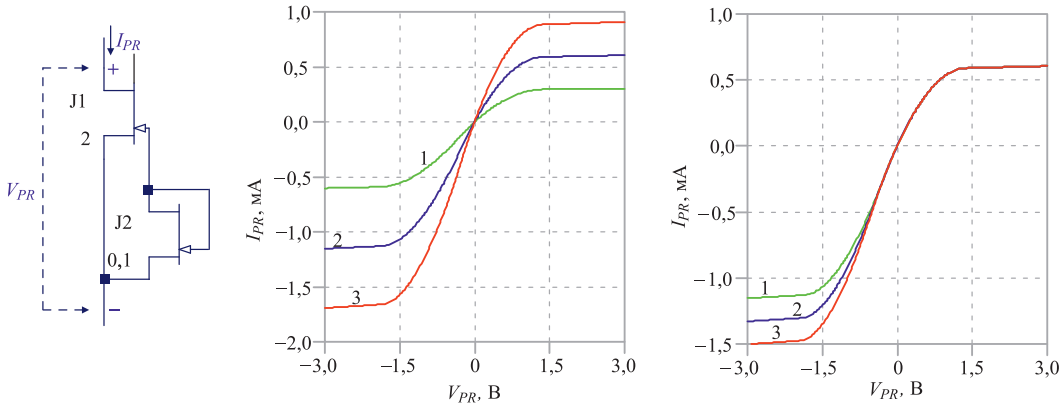
Следует отметить, что узлы Vbias1, Vbias2 на всех схемах соединены между собой, а для параллельно соединенных транзисторов приведены масштабирующие коэффициенты, показывающие количество транзисторов в соединении. В блоке смещения применены известные схемотехнические решения: слабо зависящий от температуры ток получен выбором сопротивления резистора R1, задающим ток стока каскодного соединения *n*-ПТУП J1, J2, соответствующим термостабильной точке вольт-амперной характеристики; PTAT-источник тока сформирован на транзисторах Q15, Q16 и резисторе R10, при этом площадь эмиттерного перехода Q15, превышающая площадь эмиттерного перехода Q16 в пять раз, устанавливает PTAT-ток через резистор R10 на уровне $I_{R10} \approx \varphi_T \mathrm{Ln}5/R10$; элементы Q6–Q8, R7 являются цепью запуска и не влияют на величину I_{R10} [4].

Работа ОУ рассмотрена в [9]. Модернизация блока смещения ОУ обеспечила возможность простого программирования его параметров (табл. 1), что может быть полезным при оптимизации параметров как самого ИУ, так и дополнительных ОУ, размещенных на одном кристалле с ИУ. Варьирование сопротивлений истоковых резисторов R3, R4 в диапазоне от 1 до 100 Ом обеспечивает компенсацию напряжения смещения нуля ОУ величиной до 4,5 мВ, возникающую из-за технологического разброса параметров интегральных элементов.

Таблица 1. Результаты моделирования основных параметров операционного усилителя при различном сопротивлении токозадающего резистора R22 на рис. 4
Table 1. Results of circuit simulation the main parameters of the operational amplifier with different resistance of the current-setting resistor R22 in Fig. 4

Наименование параметра	Величина параметра при сопротивлении R22, кОм		
	3	6	12
Ток потребления, мкА	1252	669	351
Максимальное выходное напряжение при напряжении питания 0/5 В и сопротивлении нагрузки 10 кОм, В	От 0,067 до 4,920	От 0,069 до 4,920	От 0,071 до 4,910
Напряжение смещения нуля, мВ	–0,371	–0,355	–0,400
Коэффициент усиления напряжения	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$4{,}4 \cdot 10^4$
Частота единичного усиления, МГц	5,79	3,42	2,23
Запас по фазе на частоте единичного усиления, град.	58°	60°	60°
Спектральная плотность напряжения шума, отнесенная ко входу, на частоте 1 кГц, нВ/√Гц	12,04	15,52	20,99

Возможность использования при схемотехническом синтезе *n*-ПТУП позволила сформировать защитный элемент с двунаправленным ограничением тока (рис. 5), в котором изменением масштабирующего коэффициента (AREA) транзистора J1 устанавливаются максимальный ток ограничения и сопротивление в линейной области вольт-амперной характеристики, а коэффициентом AREA для J2 – отношение положительного тока ограничения к отрицательному (за положительное направление тока ограничения I_{PR} принят ток, втекающий в сток J1 при напряжении на нем, превышающим напряжение истока J2).



a *b* *c*

Рис. 5. Защитный элемент с двунаправленным ограничением тока: *a* – электрическая схема; *b* – вольт-амперная характеристика при AREAJ2 = 0,1: 1 – AREAJ1 = 1; 2 – AREAJ1 = 2; 3 – AREAJ1 = 3; *c* – вольт-амперная характеристика при AREAJ1 = 2: 1 – AREAJ2 = 0,1; 2 – AREAJ2 = 0,5; 3 – AREAJ2 = 1

Fig. 5. Protective element with bipolar current limiting: *a* – electrical circuit; *b* – current-voltage characteristic at AREAJ2 = 0.1: 1 – AREAJ1 = 1; 2 – AREAJ1 = 2; 3 – AREAJ1 = 3; *c* – current-voltage characteristic at AREAJ1 = 2: 1 – AREAJ2 = 0.1; 2 – AREAJ2 = 0.5; 3 – AREAJ2 = 1

Рассмотрим подробнее работу предусилителя на рис. 2. Токи истока полевых транзисторов J7, J8 заданы термостабильными источниками тока Q36, Q35 на уровне 38 мкА, при этом их напряжение исток-затвор составляет около 0,98 В, что обеспечивает работоспособность транзисторов Q20, Q22 при нулевом значении входного синфазного напряжения. В эмиттерную и коллекторную цепь Q20, Q22 включены PTAT-источники тока Q17, Q19 и Q30, Q32 с эмиттерными резисторами R11, R14 и R19, R22, отношение которых и, следовательно, отношение коллекторных токов I_{C17}/I_{C19} и I_{C30}/I_{C32} можно изменять внешним потенциометром.

Особое внимание уделено уменьшению зависимости β транзисторов Q20, Q22 от уровня синфазного и дифференциального входного напряжения. Для этого:

– напряжение коллектор-база Q20, Q22 устанавливалось на постоянном уровне около минус 0,2 В в диапазоне изменения синфазного сигнала за счет работы двух цепей следящей ОС: J3, Q24, Q25, R16, Q28 и J4, Q26, Q27, R17, Q29;

– напряжение затвор-исток J3 и J4 обеспечивалось близким к нулю благодаря заданию токов истока диодным соединением J5 и J6;

– влияние цепей следящей ОС на эмиттерные токи Q20, Q22 предельно уменьшалось, поскольку токи затворов J3 и J4 в нормальных условиях менее 5 пА, что существенно меньше, чем эмиттерные токи Q20 и Q22 – около 37 мкА.

К сожалению, для обеспечения работоспособности при отрицательном уровне входного синфазного напряжения требуется довольно большое падение напряжения исток-затвор J7, J8, которое достигается при малой величине их тока истока. При этом значительно уменьшается крутизна J7, J8 и возрастает спектральная плотность напряжения шума, отнесенная ко входу. Возможным решением указанной проблемы является замена истоковых повторителей J7, J8 на *p-n-p*-эмиттерные повторители, что одновременно приводит к увеличению входного тока ИУ.

Результаты схемотехнического моделирования основных параметров ИУ приведены в табл. 2, из которой видно, что полоса пропускания ИУ не зависит от типа транзисторов во входных повторителях напряжения, хотя применение в них *p-n-p* вместо *n*-ПТУП приводит к 20%-ному

уменьшению спектральной плотности напряжения шума и 5%-ному уменьшению тока потребления предусилителя с входным повторителем напряжения. При этом входной ток ИУ в нормальных условиях возрастает более чем в 1000 раз.

Таблица 2. Результаты моделирования основных параметров инструментального усилителя с различным типом входных повторителей напряжения при напряжении питания 0/5 В
Table 2. Results of circuit simulation the main parameters of an instrumentation amplifier with different types of input voltage followers at supply voltage 0/5 V

Наименование параметра	Значение параметра с входными повторителями	
	n-ПТУП	*p-n-p*
Ток потребления предусилителя и входных повторителей, мкА	255,6	241,8
Минимально допустимое входное синфазное напряжение, В	–0,15	0,13
Входной ток, нА	0,016	66,800
Полоса пропускания, кГц, при усилении, равном: 1000 10	 13,2 307,8	 13,1 307,3
Спектральная плотность напряжения шума на частоте 1 кГц, нВ/√Гц, при усилении, равном: 1000 10	 14,8 19,4	 11,6* 17,0
*Возможно уменьшение до 9,47 нВ/√Гц при одновременном увеличении входного тока до 175,6 нА.		

Заключение

1. На основе анализа серии микросхем фирмы Analog Devices установлены основные конструктивно-схемотехнические особенности прецизионных инструментальных усилителей. Отмечено, что для изготовления микросхем инструментальных усилителей, работоспособных в широком диапазоне однополярного напряжения питания, предпочтительнее применение комплементарных биполярных транзисторов и *n*-ПТУП, например, реализуемых по технологическому маршруту «40 В комплементарный биполярный с изоляцией *p-n*-переходом» ОАО «Интеграл».

2. Для элементной базы указанного технологического маршрута разработаны основные блоки, позволяющие синтезировать инструментальные усилители с разным сочетанием параметров, а именно:

– дифференциальный предусилитель с различными видами входных повторителей напряжения на *n*-ПТУП- и *p-n-p*-транзисторах;

– операционный усилитель, работоспособный при нулевом уровне входного синфазного напряжения и однополярном напряжении питания, с размахом выходного напряжения, близкого к напряжению источника питания;

– блок смещения, генерирующий как термостабильный выходной ток, так и ток, пропорциональный абсолютной температуре, для задания рабочего режима разных каскадов инструментального усилителя;

– защитный элемент с двунаправленным ограничением тока на основе двух *n*-ПТУП разных размеров.

3. Для разработанных блоков приведены результаты моделирования, показывающие возможность программирования различного сочетания параметров.

Список литературы / References

1. Dvornikov O., Tchekhovski V., Popov A. (2025) Design of Bipolar Analog Basic Matrix Crystals. *Electronic Components.* (1), 48–53 (in Russian).
2. Dvornikov O., Tchekhovski V., Popov A. (2025) Development and Application of High-Power Analog Basic Matrix Crystals in the Design of Power Analog Integrated Circuits. *Electronic Components.* (5), 14–20 (in Russian).

3. Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A. (2025) Design of a Set of Analog Microcircuits for Processing Signals from High-Resistance Sensors. *Devices and Methods of Measurements.* 16 (4), 333–343. DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-4-333-343 (in Russian).
4. Tietze W., Schenk K. (2007) *Semiconductor Circuitry*. Moscow, DMK Press Publ. (in Russian).
5. Fonderie J., Maris M. M., Schnitger E. J., Huijsing J. H. (1989) 1-V Operational Amplifier with Rail-to-Rail Input and Output Ranges*. IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 24 (6), 1551–1559. DOI: 10.1109/4.44990.
6. Vyne R. L., Petty T. D., Koda R., Susak D. M. (1992) A Quad Low Voltage Rail-to-Rail Operational Amplifier. *Proceedings of the 1992 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Minneapolis, MN, USA*. 242–245. DOI: 10.1109/BIPOL.1992.274041.
7. Bowers D. F. (1987) A 20-/spl mu/W Precision Operational Amplifier. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 22 (3), 322–329. DOI: 10.1109/JSSC.1987.1052728.
8. Wurcer S. A., Counts L. W. (1982) A Programmable Instrumentation Amplifier for 12-bit Resolution Systems. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 17 (6), 1102–1111. DOI: 10.1109/JSSC.1982.1051867.
9. Close J. P., Santos F. (1993) A JFET Input Single Supply Operational Amplifier with Rail-to-Rail Output. *1993 Proceedings of IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, *Minneapolis, MN, USA*. 149–152. DOI: 10.1109/BIPOL.1993.617487.

Поступила 14.07.2026
Received: 14 July 2026

Принята в печать 18.08.2026
Accepted: 18 August 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Дворников О. В., д-р техн. наук, доц., гл. науч. сотр., ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

Чеховский В. А., зав. лаб., Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета

Information about the authors

Dvornikov O., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Principal Researcher, OJSC "Minsk Research Instrument-Making Institute"

Tchekhovski V., Head of Laboratory, Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University

Адрес для корреспонденции

220113, Республика Беларусь,
Минск, ул. Я. Коласа, 73
ОАО «Минский научно-исследовательский
приборостроительный институт»
Тел.: +375 29 616-45-87
E-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by
Дворников Олег Владимирович

Address for correspondence

220113, Republic of Belarus,
Minsk, Ya. Kolasa St., 73
OJSC "Minsk Research
Instrument-Making Institute"
Tel.: +375 29 616-45-87
E-mail: oleg.dvornikov@mnipi.by
Dvornikov Oleg