

Диагностическим признаком (критерием) работоспособного состояния электромеханической системы является совпадение текущего спектра с эталонным. Применительно к асинхронному двигателю диагностическим признаком обрыва фазы является рост амплитуды третьей гармоники спектра магнитной индукции, а виткового замыкания в обмотках статора – рост амплитуд третьей и пятой гармоник спектра.

Выбор вариантов частичной либо комплексной интеграции перечисленных ранее методов, сопровождающих непосредственное измерение физической величины, определяется уровнем решаемых задач, как при синтезе базовых алгоритмов управления, так и при реализации сервисных функций с учётом имеющихся у разработчика вычислительных ресурсов, ориентированных на работу в реальном масштабе времени.

Л и т е р а т у р а

1. **Андреев А. Н., Андреев М. А., Колесниченко Д. А., Шатков А. П.** Непосредственное управление моментом в асинхронном электроприводе на основании измерения магнитной индукции в воздушном зазоре // Системы управления и информационные технологии. 2017. № 2 (68). С. 78–81.
2. **Колесниченко Д. А., Елюков А. С., Шейбухов С. Н.** Быстродействующая система защиты и диагностирования

асинхронных электродвигателей // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы 7^й Междунар. науч.-техн. конф. Вологда, ВоГТУ, 2012. С. 186–188.

3. **Бирюков Е. Н., Ершов Е. В.** Автоматизация контроля технического состояния опор скольжения агрегатов металлургического производства // Производство проката. 2008. № 2. С. 35–40

4. **Сидельников Л. Г., Афанасьев Д. О.** Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое дело. 2013. № 7. С. 127–137.

5. **Пахолков И. В., Ершов Е. В., Воронов А. М.** Методы фильтрации значений в системе сбора данных // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы 12^й Междунар. науч.-техн. конф. Вологда, ВоГУ, 2017. С. 180–183.

6. **Водовозов А. М., Елюков А. С.** Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах // Вестник ИГЭУ. 2010. № 2. С. 69–71.

Дата принятия: 29.05.2018.

535.36; 543.421; 543.422

Улучшение электрических характеристик измерительной аппаратуры на основе операционных усилителей Rail-to-Rail

А. И. СЕРГЕЕВ, А. А. СУВОРОВ

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: anton.suvorov@urfu.ru

Описан способ, позволяющий увеличить динамический диапазон сигналов и уменьшить динамическую погрешность входных каскадов измерительной аппаратуры на основе операционных усилителей Rail-to-Rail. Разработана электрическая схема данной аппаратуры. Приведены результаты тестирования операционных усилителей Rail-to-Rail при следящем питании.

Ключевые слова: операционный усилитель Rail-to-Rail, следящее питание, динамический диапазон, частота единичного усиления.

Paper describes a method and electric circuit that allow to increase the dynamic range of signals and reduce the dynamic error of input cascades of the measuring equipment on the basis of operational amplifiers Rail-to-Rail. The experimental material is presented.

Key words: Rail-to-Rail operational amplifier, tracking supply, dynamic range, unity gain frequency.

Инструментальный операционный усилитель (ОУ) Rail-to-Rail является одним из основных компонентов входных каскадов современной прецизионной измерительной техники. Вопросы разработки новых, более совершенных по характеристикам, ОУ остаются актуальными и часто освещаются

в научных публикациях, например в изданиях IEEE и других [1–4]. Одним из мировых лидеров в области аналоговой микроэлектроники является компания Analog Devices (США). Электрические характеристики прецизионных ОУ Rail-to-Rail, выпускаемых этой компанией, приводятся в технической

Т а б л и ц а 1

Параметры операционных усилителей Rail-to-Rail производства Analog Devices

Наименование ОУ	Частота единичного усиления, МГц	Максимальная скорость нарастания выходного сигнала, В/мкс	Напряжение смещения, мкВ	Входные токи, пА	Максимальное напряжение питания, В
ADA4084–4	12,30	2,60	40,0	140·10 ³	30,0
ADA4528–1	6,50	0,50	0,3	200,0	5,5
AD8657	0,20	0,07	350,0	20,0	18,0
ADA4091–4	1,27	0,46	40,0	44·10 ³	30,0
ADA4665–2	1,20	1,00	4000,0	1,0	16,0
AD8652	50,00	41,00	100,0	1,0	5,5
AD8618	24,00	12,00	23,0	0,2	6,0
AD8616	24,00	12,00	80,0	0,2	6,0
AD8607	0,40	0,10	12,0	0,2	5,0
AD8603	0,40	0,10	12,0	0,2	6,0
AD8574	1,50	0,40	1,0	10,0	6,0
AD8572	1,50	0,40	1,0	10,0	6,0
AD8571	1,50	0,40	1,0	10,0	6,0
AD8554	1,50	0,40	1,0	10,0	5,5
AD8552	1,50	0,40	1,0	10,0	5,5
AD8551	1,50	0,40	1,0	10,0	6,0

документации. Различные ОУ, как правило, имеют разные значения максимального напряжения питания, напряжения смещения, входных токов, скорости нарастания выходных сигналов и т. д. Не существует идеального по всем характеристикам ОУ. В табл. 1 представлены основные характеристики ОУ с отдельными наилучшими параметрами согласно данным разработчиков. Все ОУ имеют максимально допустимые входные и максимальные выходные сигналы по напряжению, практически равные напряжению питания – Rail-to-Rail In и Rail-to-Rail Out, соответственно.

В настоящей статье авторы ограничились параметрами, указанными в табл. 1, характеризующими особо точные (прецизионные) ОУ. Входные токи ОУ определяют аддитивную погрешность измерений при работе с источниками сигналов, которые имеют высокое выходное сопротивление, а напряжение смещения – температурную стабильность и аддитивную погрешность при измерениях малых напряжений. Максимальное напряжение питания влияет на динамический диапазон входных и выходных сигналов. Частота единичного усиления и косвенно связанная с ней скорость нарастания выходного сигнала формируют динамическую погрешность измерений.

Анализ рассмотренных характеристик позволяет сделать вывод, что ОУ с минимальными входными токами и напряжениями смещения имеют либо малые динамические диапазоны входных и выходных сигналов, либо малые частоту единичного усиления и скорость нарастания выходных сигналов, либо и то, и другое. Указанные закономерности характерны не только для ОУ Rail-to-Rail, выпускаемых Analog

Devices, но и для усилителей других компаний, например Texas Instruments, Maxim Integrated (США), STMicroelectronics (Швейцария).

Большой динамический диапазон входных и выходных сигналов при применении таких ОУ часто необходим на стадии предварительной обработки аналоговых сигналов, т. е. до аналого-цифрового преобразования. Это актуально, например, если амплитуда измеряемых сигналов превышает напряжение питания усилителей Rail-to-Rail, а также при измерениях малых сигналов переменного напряжения, наложенных на относительно большую постоянную составляющую напряжения. Увеличение частоты единичного усиления (скорости нарастания выходных сигналов) уменьшает динамические погрешности измерений.

В Уральском федеральном университете исследовали возможности улучшения указанных характеристик прецизионной измерительной электроники на основе ОУ Rail-to-Rail. Для этого тестировали ОУ с однополярным питанием и нулевым дрейфом напряжения AD8551. Эксперименты показали, что частоту единичного усиления и динамический диапазон входных и выходных сигналов можно значительно увеличить при использовании следящего питания ОУ.

Прямое измерение скорости нарастания выходного сигнала производится в режиме насыщения ОУ, т. е. при его перегрузке и, как следует из дальнейшего описания, даёт результат, который не всегда можно однозначно интерпретировать при наличии следящего питания. Для определения частоты единичного усиления требуется измеритель частотной ха-

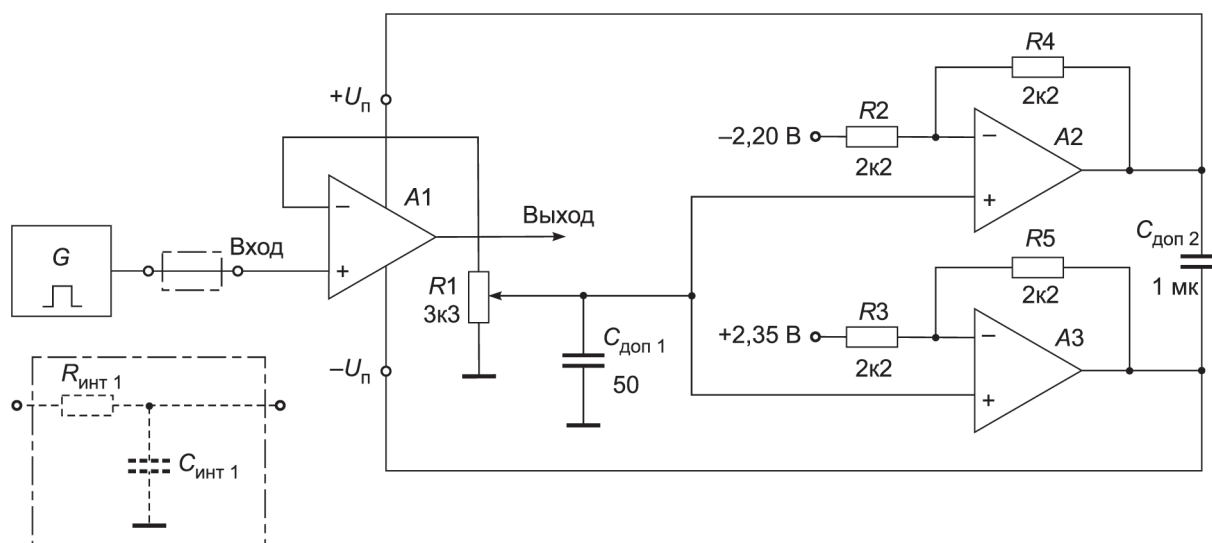


Рис. 1. Электрическая схема операционных усилителей Rail-to-Rail со следящим питанием: A1 – исследуемый ОУ Rail-to-Rail; A2, R2, R4 и A3, R3, R5 – сумматоры напряжений; G – генератор прямоугольных сигналов; $+U_n, -U_n$ – напряжение питания; R1 – делитель напряжения; $R_{\text{инт.1}}, C_{\text{инт.1}}$ – резистор и конденсатор входной интегрирующей цепи (фильтр низких частот), соответственно; $C_{\text{доп1}}, C_{\text{доп2}}$ – дополнительные конденсаторы

рактические. Также необходим дополнительный контроль устойчивости, что на практике значительно затрудняет измерения. Поэтому основные характеристики авторы настоящей статьи определяли по реакции исследуемого ОУ Rail-to-Rail на прямоугольный входной сигнал, как это описано в работе [5], т. е. по переходной характеристике. При такой методике измерений достаточно просто и удобно контролировать как устойчивость системы, так и возможные искажения сигналов. Длительность фронтов выходных сигналов ОУ измеряли при изменении амплитуды входного прямоугольного сигнала. Рассматриваемый ОУ в это время работал в режиме неинвертирующего повторителя напряжения. Как известно из работы [6], длительность фронта обратно пропорциональна верхней граничной частоте и частоте единичного усиления.

Работу усилителей Rail-to-Rail со следящим питанием авторы поясняют электрической схемой (рис. 1), на которой A1 – тестируемый усилитель Rail-to-Rail AD8551, A2, A3 – доступные по цене высокочастотные ОУ K544УД2. Переменное сопротивление R1 выполняет функцию делителя напряжения. В качестве источника сигналов выбран генератор G прямоугольных сигналов Г5-60. Максимальная амплитуда выходных сигналов генератора составляет 11 В, а длительность фронтов не превышает 20 нс. Для контроля и записи данных применяли осциллографы GOS 620 и FLUKE 196C.

Напряжение питания усилителей A2, A3 оказалось симметричным и эквивалентным значениям 12,1 и –12,1 В, соответственно (на схеме не показано). Для получения вспомогательных напряжений, равных 2,35 и –2,2 В, использовали светодиоды белого свечения (как аналог стабилитрона) с эмиттерными повторителями (на схеме не показаны). Выход ОУ A1, работающего в режиме повторителя, подключён через делитель напряжения R1 к обоим неинвертирующим входам усилителей A2, A3.

Если напряжение на входе усилителя A1 нулевое, то напряжение на выходах усилителей A2, A3 составляет, соответственно, 2,35 и –2,2 В. Выходные напряжения ОУ A2, A3 являются напряжениями питания ОУ A1. При изменении выходного напряжения ОУ A1 оба напряжения питания этого усилителя синхронно изменяются (сдвигаются) при сохранении разности $+U_n$ и $-U_n$, равной 4,55 В. При этом

$$+U_n = 2,35 + 2U_d; \quad -U_n = -2,2 + 2U_d,$$

где U_d – выходное напряжение делителя R1.

Из рассмотренного выше алгоритма работы следует, что в разработанной схеме реализована следящая обратная связь по питанию (СОСП). Таким образом, чем больше выходной сигнал ОУ A1 положительной полярности, тем больше напряжение питания $+U_n$ и меньше по модулю $-U_n$. Аналогично, чем больше по модулю выходной сигнал ОУ A1 отрицательной полярности, тем больше по модулю напряжение питания $-U_n$ и меньше $+U_n$.

Устойчивость системы, динамический диапазон выходных сигналов ОУ A1 и длительности фронтов выходных сигналов зависят от глубины обратной связи, а следовательно, и от коэффициента передачи K_n делителя R1 по напряжению. При оптимальной глубине обратной связи система устойчива, длительности фронтов выходных сигналов ОУ A1 минимальные, а выбросы на фронтах не превышают 3–5 % от амплитуды сигналов.

На первом этапе тестирования для исследования влияния следящего питания на частоту единичного усиления выход генератора G был подключён непосредственно к входу ОУ A1.

Результаты измерений. Зависимости длительностей положительного и отрицательного фронтов $T_{\text{ф}}$ от амплитуды U_{max} выходных сигналов ОУ A1 показаны на рис. 2. Длитель-

ности положительных и отрицательных фронтов сигналов обеих полярностей отличаются незначительно, поэтому для построения зависимостей взяты средние значения длительностей этих фронтов. Из рис. 2 следует, что длительности как положительных, так и отрицательных фронтов при существовании СОСП примерно в два раза меньше, чем при её отсутствии, что соответствует такому же увеличению граничной частоты и частоты единичного усиления.

Измерения проводили при $K_n \approx 0,28$, причём экспериментально было установлено, что в данном случае – это значение оптимальное. Учитывалось, что K_n – оптимальный коэффициент для всего исследуемого динамического диапазона сигналов. Так, минимальная длительность фронтов сигналов с амплитудой 2,5 В и выше достигалась для $K_n \approx 0,37$, но при этом для сигналов с амплитудой в диапазоне 0,5–1,0 В выбросы на их фронтах резко увеличивались, и система находилась на границе устойчивости.

Было замечено, что при $K_n = 0,28$ максимальная амплитуда входного сигнала положительной полярности возросла с 2,35 В (исходное напряжение питания) до 3,2 В, а отрицательной – с –2,3 В до –3,1 В. Значения этих амплитуд, как и оптимальные значения данного коэффициента, разные для различных экземпляров ОУ, но отличаются они незначительно. Следовательно, динамический диапазон при следящем питании по сравнению с исходным (без обратной связи) при $K_n = 0,28$ увеличился примерно в 1,36 раза.

Значения динамического диапазона входных сигналов при следящем питании обусловлены глубиной СОСП. Чем больше коэффициент K_n , тем выше напряжение питания ОУ. Было также установлено, что величина динамического диапазона зависит и от формы входного сигнала, в данном случае – от длительности фронта входного прямоугольного импульса или скорости его нарастания.

В рассматриваемой системе при анализе динамического диапазона необходимо различать максимальный наблюдаемый на экране осциллографа сигнал и максимальный неискажённый сигнал. Далее под максимальным сигналом будем понимать именно неискажённый сигнал. Задержка распространения сигнала в ОУ А1 (без учёта задержки в «быстрых» ОУ А2, А3) приводит к задержке установки (по цепи обратной связи) его напряжения питания, которое должно соответствовать входному сигналу. Это может привести к превышению максимального входного дифференциального напряжения и превышению входным напряжением напряжения питания. В таком случае возникает перегрузка входных цепей ОУ Rail-to-Rail и опасность их пробоя. Характерные искажения фронтов входного сигнала в подобных случаях проявляются в затягивании передних фронтов, а выходных – в увеличении длительности плоской вершины, как и при выходе ОУ из насыщения. Особую опасность для пробоя входных цепей ОУ представляют входные сигналы, имеющие амплитуду 7–10 В и малые фронты при выключенном питании. Во время проведения исследований наблюдалось несколько случаев такого пробоя.

Дальнейшие исследования влияния формы сигналов при СОСП на их динамический диапазон проводили при интегрировании выходных сигналов генератора RC-цепью. Указанную

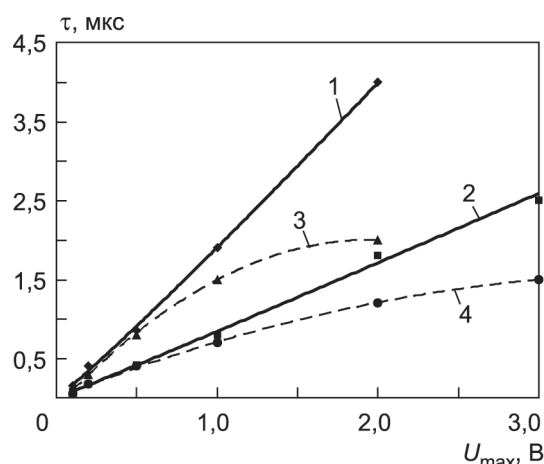


Рис. 2. Длительность фронта в зависимости от амплитуды сигнала: 1, 2 – положительные фронты без обратной связи и с обратной связью, соответственно; 3, 4 – отрицательные фронты без обратной связи и с обратной связью, соответственно

цепь $R_{инт1}C_{инт1}$ подключали между выходом генератора и входом ОУ А1 (см. рис. 1), что позволило моделировать работу усилителей для входных сигналов с низкой скоростью нарастания. Исследования показали, что при увеличении длительности фронта входного сигнала коэффициент передачи K_n может возрасти примерно до 0,37 без потери устойчивости во всём динамическом диапазоне. Это можно объяснить увеличением запаса устойчивости по фазе. Незначительные возможные колебания на фронтах выходного сигнала, возникающие, например, при переходных процессах, устраняются при введении дополнительной ёмкости $C_{доп1} = 40–100$ пФ, которую устанавливают на выходе делителя напряжения R1 (см. рис. 1).

В табл. 2 приведены амплитуды максимальных входных сигналов обеих полярностей (по модулю) в зависимости от значения постоянной времени интегрирования цепи $T_1 = R_{инт1}C_{инт1}$ при $K_n = 0,37$.

На графике (рис. 3) показана зависимость максимальной амплитуды U_{max} от постоянной времени интегрирования T_1 . Представлены средние значения по модулю максимальных амплитуд сигналов обеих полярностей. При этом напряжение насыщения U_n усилителей А2, А3 примерно равно 10,6 В для обеих полярностей. Для постоянной времени $T_1 = 1,14$ мкс максимальное значение амплитуды

Т а б л и ц а 2
Амплитуды максимальных входных сигналов

T_1 , мкс	Амплитуда	
	$+U_{max}$, В	$-U_{max}$, В
0,06	3,90	3,70
0,12	4,60	4,30
0,24	6,00	5,50
0,48	7,80	7,40
0,72	9,10	8,80
0,87	9,60	9,50
1,14	9,90	9,90
3,38	10,20	10,20
5,14	10,30	10,30
7,07	10,60	10,60

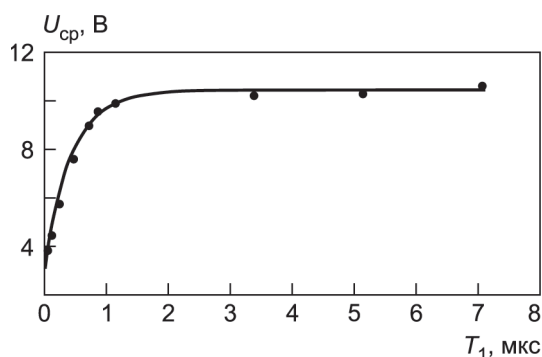


Рис. 3. Зависимость максимальной амплитуды от постоянной времени интегрирования

$U_{\max}=0,93U_n$. При дальнейшем увеличении T_1 рост максимальной амплитуды существенно уменьшается. Максимальная амплитуда достигает напряжения насыщения при $T_1=7,07$ мкс и более. Искажения выходных сигналов, характерные для насыщения усилителя А1 (как и любых ОУ), появляются для всех значений T_1 . Экспериментально установлено, что значение коэффициента $K_n=0,37$ близко к оптимальному во всём диапазоне для сигналов, имеющих амплитуду более 2,5 В. Однако дальнейшее увеличение этого коэффициента может привести к искажениям выходных сигналов, т. е. уменьшению динамического диапазона. Максимальный выходной сигнал с амплитудой, равной напряжению насыщения, можно получить и для меньших коэффициентов K_n , но при больших значениях постоянной времени интегрирующей цепи T_1 , т. е. для входных сигналов с большей длительностью фронта или меньшей скоростью нарастания.

Для гарантированного исключения пробоя входных цепей ОУ А1 перед выключением питания уменьшали амплитуду сигналов генератора до безопасного значения, равного 2–3 В. При интегрировании RC-цепью сигналов генератора амплитудой до 10 В и более, а также при случайном выключении питания пробоя входных цепей указанного усилителя не наблюдалось.

Входную цепь $R_{\text{инт1}}C_{\text{инт1}}$ использовали для моделирования сигналов с низкой скоростью нарастания. При постоянной времени $T_1 \geq 0,06$ мкс резкого увеличения выбросов на фронтах сигналов, имеющих амплитуду 0,50–1,0 В, не наблюдалось, как и при $K_n=0,37$ без цепи $R_{\text{инт1}}C_{\text{инт1}}$. Поэтому данное значение коэффициента передачи можно считать близким к оптимальному для сигналов реального источника напряжения от нуля до максимального значения (в пределе напряжения насыщения вспомогательных ОУ), времена нарастания которых не превышают длительность фронта выходных сигналов цепи $R_{\text{инт1}}C_{\text{инт1}}$.

В ходе эксперимента продублировали первые измерения, проводившиеся без интегрирующей цепи $R_{\text{инт1}}C_{\text{инт1}}$, но с корректирующей ёмкостью $C_{\text{доп1}}$. Было установлено, что в таких условиях коэффициент K_n может увеличиваться примерно до значений 0,36–0,37 при $C_{\text{доп1}} \approx 100$ пФ. При этом зависимость длительности фронтов выходных сигналов ОУ А1 от амплитуды (см. рис. 2) с максимальной амплитудой примерно 3,7 В осталась аналогичной. При дальнейшем увеличении ампли-

туды возникало искажение формы сигналов. Необходимо отметить, что для ОУ Rail-to-Rail другого типа оптимальный коэффициент K_n может быть иным.

Таким образом, для постоянной времени $T_1 \geq 7,07$ мкс достигнут динамический диапазон сигналов, равный удвоенному напряжению насыщения вспомогательных ОУ, а именно 21,2 В. Операционный усилитель Rail-to-Rail при этом работал в нормальном режиме и сохранял основные характеристики – малые входные токи и напряжение смещения во всём динамическом диапазоне. Если в качестве дополнительных усилителей А2, А3 применить высоковольтные ОУ, например 1408УД1 ($U_n=\pm 27$ В) или LM143 ($U_n=\pm 38$ В), то динамический диапазон сигналов может значительно увеличиться.

Влияние СОСП на шумовые характеристики исследовали с помощью измерительной схемы, представленной на рис. 4. Первый каскад схемы – неинвертирующий усилитель на основе ОУ А4 с коэффициентом усиления $K_y \approx 500$. Вход усилителя был подключён к выходу исследуемого ОУ Rail-to-Rail А1 (см. рис. 1), а выход – к входу второго инвертирующего усилителя на основе ОУ А5 с коэффициентом усиления $K_y \approx 100$. Общий коэффициент усиления $K_y \approx 50000$. Стабилизатор базовой линии на основе ОУ А6 поддерживал постоянное нулевое напряжение на выходе ОУ А5. Вход ОУ А1 заземляли. Генератор входных сигналов G был отключён. Постоянно осуществляли осциллографический контроль и запись шумовой дорожки непосредственно на выходе ОУ А5 – для полной полосы пропускания, а также для ограниченной полосы в диапазоне частот 0–17 Гц. Частотный диапазон ограничивали посредством фильтра низкой частоты, т. е. интегрирующей цепью $R_{\text{инт2}}C_{\text{инт2}}$ с постоянной времени $T_2=1,011$ с.

При определении с помощью методики [7] действующего значения шума по осциллограмме погрешность измерений составила порядка 10 %. Более точные измерения принято проводить с использованием специальных микросхем, предназначенных для измерения среднеквадратичного значения шума. Однако цель эксперимента состояла не в точном определении уровня шумов, а в оценке влияния следящей связи на изменение уровня шумов. Для этого к выходу второго усилителя А5 последовательно подключали каскад: «идеальный диод» – фильтр низкой частоты, в качестве которого применяли интегрирующую цепь $R_{\text{инт3}}C_{\text{инт3}}$, – повторитель напряжения А7 – вольтметр В Ц301-2. Для цепи $R_{\text{инт3}}C_{\text{инт3}}$ постоянная времени $T_3 \approx 5$ с. Классический «идеальный диод» описан в работах [8, 9].

По наблюдаемым при измерениях осциллограммам сделать выводы об изменении действующего значения шумов при наличии СОСП и без неё невозможно, так как осциллограммы практически не отличаются.

Показания вольтметра следующие: при разомкнутой следящей связи по питанию $U_{\text{ш}}=95,80$ мВ, а при замкнутой – $U_{\text{ш}}=101,00$ мВ. При этом отмечено увеличение уровня шумов $U_{\text{ш}}$ на 2,8 %. При подключении конденсатора $C_{\text{доп2}}$ между выходами ОУ А2, А3 (см. рис. 1) уровень шумов снижается. При $C_{\text{доп2}}=1$ мкФ (керамический конденсатор) показания вольтметра при замкнутой следящей связи $U_{\text{ш}}=96,75$ мВ. В этом случае увеличение уровня шумов $U_{\text{ш}}$ составляет 1,0 %.

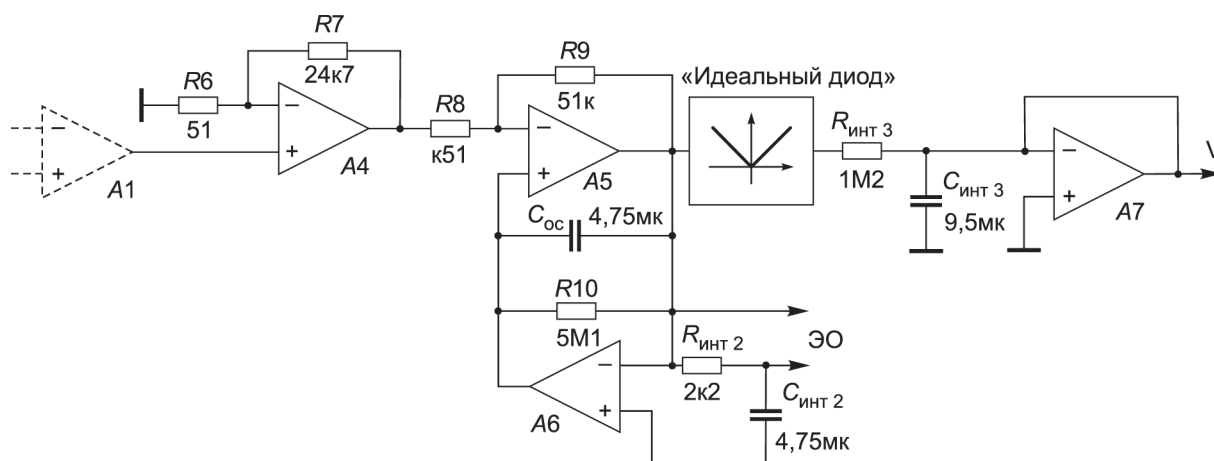


Рис. 4. Схема для исследования влияния следящей обратной связи по питанию на шумовые характеристики: A1 – исследуемый ОУ Rail-to-Rail; A4, R6, R7 – неинвертирующие усилители; A5, R8, R9 – инвертирующие усилители; A6, R10, C_{ос} – стабилизаторы нулевого уровня напряжения на выходе ОУ A5; R_{инт2}, C_{инт2}, R_{инт3}, C_{инт3} – резисторы и конденсаторы интегрирующей цепи (фильтр низких частот), соответственно; A7 – повторитель напряжения; V – вольтметр; ЭО – электронный осциллограф

Ёмкость C_{доп2} не влияет на динамический диапазон и частоту единичного усиления, поскольку её заряд при синхронном изменении напряжения питания A1 не изменяется. Наиболее вероятно, что такая фильтрация уменьшает вклад шумов ОУ A2, A3.

Заключение. Следящее питание ОУ Rail-to-Rail позволяет увеличить частоту единичного усиления и динамический диапазон сигналов. Следящее питание эффективно по меньшей мере для относительно «медленных» прецизионных ОУ с малым динамическим диапазоном сигналов. Максимальная амплитуда входных сигналов ОУ с малой скоростью нарастания при следящем питании может быть увеличена до напряжения насыщения вспомогательных ОУ. Увеличение уровня шумов при следящем питании с дополнительной фильтрацией не превышает 1 %.

Литература

1. Wang X. Y., Yu L., Wang L. A Compact High-Accuracy Rail-to-Rail CMOS Operational Amplifier // 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Chengdu, China; 18–20 June 2010. DOI: 10.1109/ICBBE.2010.5516532.
2. Guanga Y., Binb Yu. Design and Analysis of a High-Gain Rail-To-Rail Operational Amplifier // Elsevier Procedia Engineering. 2012. V. 29. P. 3039–3043. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.436.
3. Zhang Shu-Hang, Feng Yu-Cheng, Shiau Miin-Shyue, Wan Qi-Ming, Liu Don-Gey. A High-Slew Rate Rail-to-Rail Operational Amplifier by Flipped Voltage Followers // 11th International Conference on ASIC (ASICON). Chengdu, China.

3–6 November 2015. DOI: 10.1109/ASICON.2015.7516984.

4. Sheeparamatti A., Vineeth Bhat M., Srivatsa M. P., Nithin M. Design of 3.3 V Rail-to-Rail Operational Amplifier for High Resolution ADC Driver Amplifier // International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA). Bangalore, India. 21–23 February 2017. DOI: 10.1109/ICIMIA.2017.7975627.

5. Коннели Дж. Аналоговые интегральные схемы. Элементы, схемы, системы и применения. Перев. с англ. Б. Н. Бронина, В. Г. Микуцкого / Под ред. М. В. Гальперина. М.: Изд-во «МИР», 1977.

6. Lenk John D. Handbook of Modern Solid-State Amplifiers. Prentice-Hall, Englewood Cliffs; N. Jersey, 1974.

7. Henry W. Ott. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. A Wiley-Interscience Publication. N. Y.–London–Sydney–Toronto: John Wiley & Sons, 1988. [Электрон. ресурс]: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mrm.1910100315> (дата обращения: 03.04.2018).

8. Nonlinear Circuits Handbook / Edited by D. H. Sheingolg. Published by Analog Devices. Norwood, Massachusetts USA, 1976. [Электрон. ресурс]: <http://www.analog.com/ru/education/education-library/nonlinear-circuits-handbook.html> (дата обращения: 03.04.2018).

9. Graeme J. G., Tobey G. E., Huelsman L. P. Operational Amplifiers Design and Applications. N. Y.: McGraw-Hill Book Company, 1971.

Дата принятия: 07.06.2018.