

Малозумящий программируемый усилитель постоянного тока с дистанционным управлением

В. Э. Иванов✉, Чье Ен Ун

Тихоокеанский государственный университет
ул. Тихоокеанская, д. 136, Хабаровск, 680035, Россия

✉ ivanov72@list.ru

Аннотация

Введение. В современной технике эксперимента известно направление, связанное с разработкой информационно-измерительных систем регистрации и анализа избыточных низкочастотных шумов. Любой измерительный канал представлен в виде многокаскадной схемы с заданными параметрами каждого каскада, что затрудняет адаптацию измерительной системы к конкретным условиям эксперимента. Решением проблемы является унификация всех компонентов канала, однако при этом одной из основных проблем является оценка собственных шумов электронных элементов, обеспечивающих изменение параметров усилителя.

Цель работы. Анализ собственных шумов электронных потенциометров, разработка малозумящего унифицированного усилителя постоянного тока с возможностью внешнего цифрового управления параметрами и исследование его характеристик.

Материалы и методы. С помощью метода суперпозиции произведен теоретический расчет шумового усиления для каждого компонента неинвертирующего усилителя. Экспериментальные исследования проводились на базе установки, представляющей собой малозумящий усилительный тракт и спектроанализатор на основе модуля сбора данных E14-440 и программного обеспечения «PowerGraph».

Результаты. По результатам теоретических расчетов шумового усиления для металлопленочных резисторов и экспериментальных исследований характеристик электронных потенциометров показано, что их удельные значения напряжений шумов практически идентичны. Использование цифрового потенциометра в качестве элемента обратной связи и малозумящего источника смещения с двухполярным питанием (AD8400), позволяют реализовать на их основе унифицированный модуль с возможностью каскадирования. Внешнее цифровое управление на основе однокристального микроконтроллера PIC18F2550, разработанного протокола канального уровня «Master-Slave» и ASCII-интерфейса командной строки на базе сети RS-485 позволяет адаптировать его к задачам измерения шумов электронных компонентов, малых токов и напряжений, фликкер-шумов, построения распределенных систем сбора и обработки информации.

Заключение. Полученные теоретические и практические результаты делают возможным проектирование многоканальных распределенных измерительных систем постоянного тока с адаптацией измерительных каналов к поставленным задачам и возможностями программной коррекции характеристик в реальном времени.

Ключевые слова: малозумящий предусилитель, электронный цифровой потенциометр, фильтр на переключаемых конденсаторах, усилитель постоянного тока, низкочастотный избыточный шум, фликкер-шум

Для цитирования: Иванов В. Э., Чье Ен Ун. Малозумящий программируемый усилитель постоянного тока с дистанционным управлением // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4. С. 99–108. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-99-108

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.04.2019; принята к публикации после рецензирования 07.05.2019; опубликована онлайн 27.09.2019

© Иванов В. Э., Чье Ен Ун, 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Low Noise Programmable DC Amplifier with Remote Control

Viktor E. Ivanov✉, Chye En Un

Pacific National University

136, Tikhookeanskaya Str., 680035, Khabarovsk, Russia

Abstract

Introduction. The developmental direction of information-measuring systems used to record, pre-process and analyse excess low-frequency noise (flicker noise) in modern experimental technology is well known. Every measuring channel is presented in the form of a multistage circuit with specified parameters at each stage. This creates difficulties in adapting a measuring system to specific experimental conditions. While the solution may be to unify all the components of the channel, the problem lies in estimating the intrinsic noise of the electronic elements which provide a change in amplifier parameters.

Objective. To analyse the intrinsic noise of electronic potentiometers. To develop a low-noise unified DC amplifier with the possibility of external digital control parameters. To study the characteristics of a DC amplifier thus developed.

Materials and methods. The superposition method was used to perform theoretical calculation of noise gain for each component of a non-inverting amplifier. Experimental studies were based on a system consisting of a low-noise amplifying path and spectroanalyser using the data acquisition module E14-440. Software "Power-Graph" was used.

Results. The results of the theoretical analysis of noise amplification for metal-film resistors and experimental studies of the characteristics of electronic potentiometers indicated that their noise voltages specific values are almost identical. The use of a digital potentiometer as a feedback element and a low-noise bipolar-powered bias source (AD8400) permitted the implementation of a unified module with cascading capability. External digital control was based on a single-chip microcontroller PIC18F2550, using the "Master-Slave" channel level protocol and ASCII-command-line interface based on RS-485 network. This control enabled adaptation for measuring electronic component noise, low currents and voltages, flicker noise and the construction of systems for information collecting and processing.

Conclusion. The theoretical and practical results achieved herein enable the design of multichannel distributed DC measuring systems. The systems will offer adaptability for measuring channels to the tasks required, and the possibility of correction of real time characteristics.

Key words: low noise preamplifier, electronic digital potentiometer, switch capacitor filter, DC amplifier, low-frequency excess noise, flicker noise

For citation: Ivanov V. E., Chye En Un. Low Noise Programmable DC Amplifier with Remote Control. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 99–108. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-99-108

Conflict of interest. The authors declares no conflict of interest.

Submitted 30.04.2019; accepted 07.05.2019; published online 27.09.2019

Введение. Измерительные системы, предназначенные для регистрации и анализа избыточных низкочастотных шумов, в настоящее время представлены в виде частных решений. Это связано в первую очередь с узким классом решаемых задач. Измерительный канал, оптимизированный для данных задач, обычно имеет малошумящий предварительный усилитель (МПУ), усилитель второй степени (промежуточный усилитель – ПУ), фильтры нижних и верхних частот (ФНЧ, ФВЧ) [1].

Обеспечить высокий коэффициент усиления обычно менее сложно, чем компенсировать составляющую постоянного тока и дрейф напряжения. ФВЧ, ограничивающий полосу пропускания канала снизу, используется для решения проблемы дрейфа. Поскольку МПУ, как правило, имеет небольшое усиление (для сохранения наилучшего отношения сигнал/шум и предотвращения насыщения из-за наличия в сигнале постоянной составляющей), фильтр включается между следу-

ющими степенями усиления, где напряжение смещения намного выше. Однако применение ФВЧ ограничивает чувствительность метода диагностики на основе измерений низкочастотного шума. ФНЧ с переменной частотой среза необходим для устранения эффектов наложения, что особенно актуально для регистрации сигналов с широким спектром (шумов).

Важной проблемой является задача согласования выхода тестируемого устройства (OUT) и входа измерительного усилителя. В большинстве случаев достаточно правильно выбрать операционный усилитель (ОУ), чтобы обеспечить оптимальное соотношение его шумового тока и шумового напряжения в сочетании с выходным сопротивлением источника сигнала. В редких случаях необходимо применять специальные решения. По этой причине МПУ обычно имеют фиксированный коэффициент усиления по напряжению и заданную полосу усиления, а также некоторые типовые решения согласования с источником сигнала.

Экспериментальные измерительные системы с описанными принципами построения измерительного канала рассмотрены в [2–8]. В указанных примерах общее усиление по напряжению невелико, поскольку анализатор спектра, используемый для дальнейшего анализа и обработки, уже имеет встроенный МПУ. В целом используемые методы и технические решения направлены на адаптацию измерительного канала к конкретным условиям эксперимента и представлены как частные решения.

В некоторых работах [9–13] представлены усилители, оптимизированные для конкретных условий применения (например, уменьшения собственных фликкер-шумов). В большинстве случаев используется технология параллельного соединения нескольких каналов с суммированием выходных напряжений или с использованием техники кросс-корреляции. Отдельного внимания заслуживает работа [10], где авторы делают попытку расширения возможностей малошумящих усилителей за счет модульного подхода, совмещая ранее предложенные методы кросс-корреляции, схемотехнические особенности дифференциальных усилителей и их каскадного соединения для общего снижения уровня шума.

Цель и постановка задачи. Для обеспечения высокой степени унификации авторами предложена концепция универсального МПУ, который может выполнять любую функцию в составе измерительного тракта. При этом не предусматривается различий между первым и последующими каскадами, а также отсутствует необходимость введения схемотехнических решений для параметрической компенсации дрейфа. Основными требованиями являются: низкий уровень собственных шумов, возможность дистанционного изменения коэффициента усиления и напряжения смещения, низкочастотная фильтрация сигнала с программируемой частотой среза, встроенная цифровая коррекция дрейфа, отсутствие ограничений частотной характеристики снизу (работа на постоянном токе), наличие цифровой системы компенсации дрейфа как в отдельном модуле, так и в составе измерительного тракта в целом. Таким образом, универсальный усилитель можно использовать как отдельно, так и в составе многокаскадной системы, что значительно расширяет его возможности [14, 15]. Основной проблемой при разработке такого усилителя является необходимость выбора и использования электронных компонентов для регулировки усиления и смещения, влияющих на шумовые характеристики.

Электронные цифровые потенциометры как элементы регулировки. Электронные цифровые потенциометры (ЭЦП) широко используются в качестве элементов управления в электронных устройствах общего назначения [16]. Для регулировки коэффициента усиления обычно используются три основные схемы подключения потенциометра (рис. 1).

Применение ЭЦП в малошумящих усилителях может быть ограничено избыточными шумами (по сравнению с металлопленочными резисторами), необходимостью униполярного напряжения питания и небольшим предельным значением сквозного тока, обычно ограниченным 3...5 мА. Схемные решения на рис. 1, а, б имеют преимущество в том, что обеспечивают постоянную силу тока через потенциометр, независимо от значения заданного коэффициента усиления по напряжению (K_u). Зависимость $K_u(R_L)$ является нелинейной, что особенно характерно для схемы, представленной на рис. 1, б.

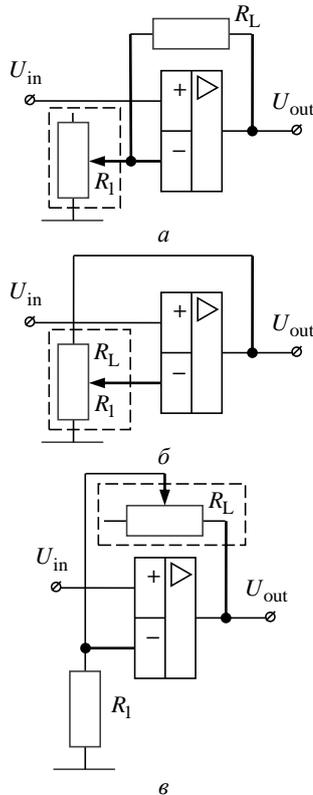


Рис. 1. Схемы подключения потенциометра для регулировки коэффициента усиления

Fig. 1. Potentiometer wiring to adjust the gain:
 a – gain control with R_1 ; б – gain control with R_1 и R_L ;
 в – gain control with R_L

Схема на рис. 1, в наиболее предпочтительна для МПУ, поскольку для резистора R_L шумовое усиление составляет $G_{n R_L} = 1$ [17]. Однако в этой схеме при малом значении R_1 возможна работа только в режиме малого сигнала, в противном случае из-за насыщения усилительного каскада возможна перегрузка R_L . Данная проблема устраняется повышением номиналов всех резисторов, однако при этом существенно возрастает вклад каждого компонента в общий уровень шума каскада. Ограничение тока через потенциометр с целью предотвращения перегрузки может быть обеспечено цифровой регулировкой усиления в реальном времени при помощи встроенного алгоритма (цифровая следящая обратная связь по току).

Чтобы использовать электронный потенциометр в качестве регулирующего элемента в МПУ, необходимо оценить вклад его собственных шумов в общие шумы усилительного каскада. Основной

проблемой при этом является отсутствие в современных публикациях данных, характеризующих характер и состав шумов потенциометра. Поэтому оказалось необходимым разработать тестовую установку для измерения шума ЭЦП и шума резистора с эквивалентным сопротивлением. Для этой цели можно использовать схему, представленную на рис. 1, а, поскольку в ней усиление шума для R_1 составляет $G_{n R_1} = R_L / R_1$ и является наивысшим значением для всех рассмотренных вариантов включения.

Для минимизации погрешности измерения необходимо также оценить процентное отношение шума R_1 и остальных источников шумов каскада. Известно [17], что для схемы, представленной на рис. 1, а, общее значение среднеквадратического шума напряжения на выходе каскада будет определяться как

$$U_n = \sqrt{E_{n R_L}^2 + E_{n R_1}^2 + E_{n \text{оп}}^2 + (i_{n \text{оп}} R_L)^2}, \quad (1)$$

где $E_{n R_L}^2$, $E_{n R_1}^2$ – среднеквадратические значения шумов резисторов R_L и R_1 соответственно; $E_{n \text{оп}}^2$ – приведенный к входу (эквивалентный) шум напряжения ОУ; $i_{n \text{оп}} R_L$ – эквивалентный шум тока входа ОУ.

Очевидно, что существует некоторое оптимальное значение R_1 , при котором его вклад в общее значение шума будет максимальным. Используя (1), вклад R_L , R_1 и ОУ [%] можно рассчитать следующим образом:

$$K_{R_L} = \left[\frac{E_{n R_L}^2 + (i_{n \text{оп}} R_L)^2}{U_n^2} \right] 100; \quad (2)$$

$$K_{R_1} = \left(\frac{E_{n R_1}^2}{U_n^2} \right) 100; \quad (3)$$

$$K_{\text{оп}} = \left(\frac{E_{n \text{оп}}^2}{U_n^2} \right) 100. \quad (4)$$

Для исследования был использован электронный потенциометр общего назначения со следующими параметрами: диапазон значений сопротивления от $R_{\text{max}} = 1$ кОм до $R_{\text{min}} = 50$ Ом; число шагов изменения сопротивления $N_s = 255$.

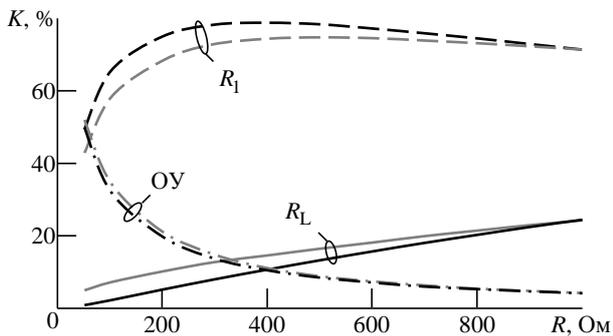


Рис. 2. Вклад элементов схемы в шум усилителя

Fig. 2. Contribution of circuit elements to amplifier noise: black curves for a fixed gain circuit; gray curves for a circuit with a fixed value of the R_L

Исследовались две схемы измерения: с фиксированным усилением и фиксированным значением R_L . Первая схема имеет преимущество в случае, когда общий коэффициент усиления измерительного тракта фиксирован и не может быть изменен. Однако это требует синхронно изменять значения R_1 и R_L для точной регулировки усиления по напряжению, что не очень удобно на практике. Вторая схема может быть использована в том случае, когда измерительная установка имеет широкий динамический диапазон. Очевидно, что в зависимости от типа схемы вклад каждого ее элемента будет разным. На рис. 2 показаны зависимости вклада указанных компонентов в общий уровень шума для первой и второй схем измерения (черные и серые кривые соответственно). Как видно из рис. 2, вклад каждого компонента, рассчитанный по (2)–(4), практически не зависит от исследуемого метода. В то же время вклад R_1 – наибольший по отношению к другим источникам шума, причем особенно превалирует в диапазоне сопротивлений 300...400 Ом. Приведенные зависимости соответствуют наиболее распространенному случаю, когда номинал резисторов обратной связи составляет 10...1000 Ом,

что обычно используется в МПУ. Увеличение номинала R_L увеличивает его вклад в общие шумы, одновременно повышая точность измерения. Таким образом, на практике целесообразно использовать схему с фиксированным значением R_L .

На рис. 3 представлена функциональная схема экспериментальной установки для исследования шумов электронных потенциометров. Усилители А1 и А2 на основе ОР37 обеспечивают основное усиление (около 10^4), усилитель А3 формирует требуемый для модуля сбора данных Е14-440 диапазон выходных напряжений ± 10 В. Таким образом, общее усиление тракта составляет около $660 \cdot 10^3$.

Фильтр МАХ7400 с внешним управлением используется в качестве ФНЧ с частотой среза, регулируемой в диапазоне $f_{cp} = 0$ К 20 кГц, которая устанавливалась синтезатором частоты F_{osc} из условия $f_{cp} = 100/F_{osc}$. Среднеквадратическое значение напряжения шума измерялось с использованием специализированного программного обеспечения "PowerGraph" методом полосовой цифровой фильтрации сигнала в диапазоне 1...2 кГц и нормализации усредненной реализации спектра относительно этого значения. Для компенсации напряжения смещения и предотвращения насыщения измерительного канала в качестве источника напряжения E_s и резистора R_s использовался цифроаналоговый преобразователь AD5320. Значение R_s выбиралось таким образом, чтобы обеспечить необходимый диапазон регулировки и заданную точность установки напряжения смещения [1, 14, 15].

На рис. 4 представлено сравнение полученных экспериментально шумовых характеристик электронного потенциометра при коэффициенте уси-

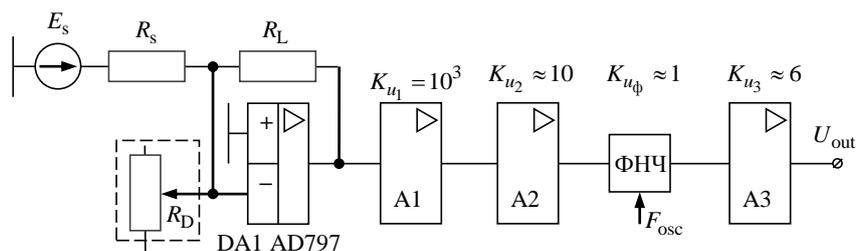


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования шумов электронных потенциометров

Fig. 3. Functional diagram of the experimental setup for the study of the noise of electronic potentiometers

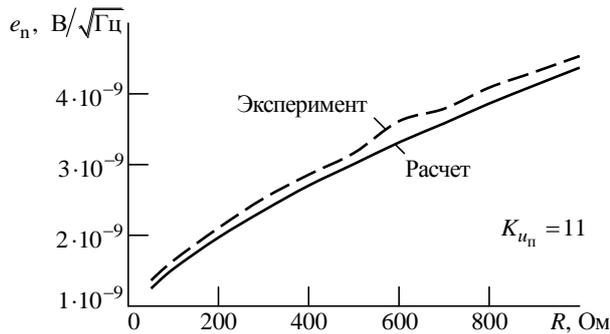


Рис. 4. Эквивалентные значения шума напряжения для усилителя с электронным потенциометром (эксперимент) и эквивалентного резистора R_1 (расчет)

Fig. 4. Equivalent voltage noise values for an amplifier with an electronic potentiometer (experiment) and an equivalent resistor R_1 (calculation)

ления МПУ $K_{u_n} = 11$ и расчетной характеристики резистора с эквивалентным значением сопротивления. Как видно из рис. 4, электронный потенциометр практически эквивалентен металлопленочному резистору по шумовым характеристикам, что позволяет использовать их в качестве элементов управления в любом МПУ. Данные измерений соответствуют частотам 1...2 кГц и не учитывают избыточные шумы, однако используя данные начальные значения для шума Джонсона и сопоставляя спектральную характеристику шумов с шумами ОУ, можно сделать вывод, что вклад низкочастотных шумов минимален и пренебрежительно мал по сравнению с фликкер-шумом ОУ.

Схемотехническая реализация МПУ. На рис. 5 представлена функциональная схема разработанного МПУ с цифровым дистанционным управлением. Основой усилителя является ОУ DA1. Поскольку источники сигнала могут иметь разные выходные сопротивления, в схеме предусмотрена возможность замены его на ОУ другого типа. Например, AD797 можно заменить на TL071, OP37, AD795, что позволяет подбирать необходимый ОУ под заданное выходное сопротивление датчика без изменения схемы управления. Усиление регулируется с помощью ЭЦП DA3 AD8400-1K в диапазоне $K_{u_n} = 5K 100$ с шагом $\Delta K_{u_n} = 0.39$ при заданном сопротивлении $R_1 = 10$ Ом (для уменьшения вклада R_1 в общие шумы усилителя).

Смещение регулируется с помощью ЭЦП DA4 AD8400-10k, включенного по схеме делителя напряжения. Диапазон и точность регулировки смещения выбираются с помощью дополнительных резисторов $R2-R4$. Напряжение смещения на выходе усилителя определяется из уравнения

$$U_{of} = \frac{\left(\frac{2U_p}{256} N_1 - U_{пит}\right) \left(\frac{10^3}{256} N_2 + 50\right)}{R_2}, \quad (5)$$

где $U_{пит}$ – напряжение питания; N_1, N_2 – значение управляющих кодов, подаваемых на DA4 и

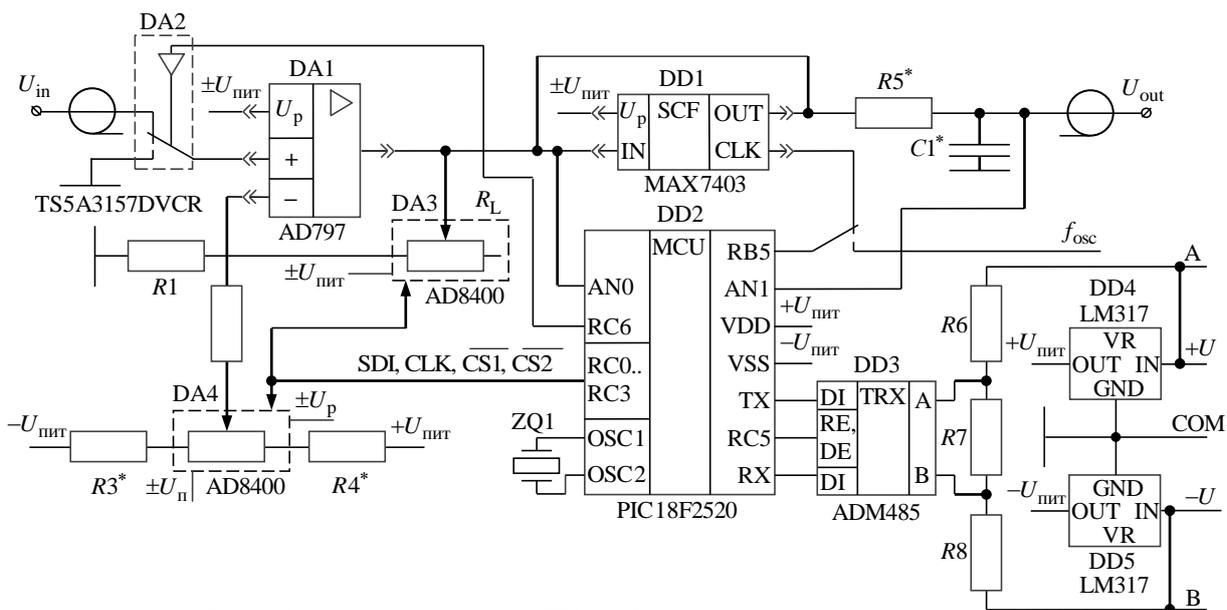


Рис. 5. Функциональная схема МПУ с цифровым дистанционным управлением
Fig. 5. Functional diagram of the low-noise pre-amplifier with digital remote control

DA3 соответственно. Управляющие коды устанавливаются микроконтроллером (МК) DD2 PIC18F2520 с использованием протокола SPI, реализованного на программном уровне. Аналоговый переключатель DA2 предназначен для реализации режима периодической компенсации дрейфа путем измерения фактического значения выходного смещения и компенсации его с помощью DA4. Этот режим может использоваться локально в каждом усилителе, но при каскадном подключении возможен более сложный алгоритм компенсации.

С использованием (5) возможна настройка усилительного каскада, обеспечивающая баланс между точностью компенсации смещения и диапазоном компенсации. Реализация и исследование таких алгоритмов являются предметом дальнейшей работы.

Очевидно, что при каскадном соединении универсальных усилителей можно достичь высокой точности установки смещения нуля на выходе всего тракта, если каждый усилитель измерительного канала задействован в этом алгоритме. Это также приводит к расширению диапазона компенсации; однако требует взаимного обмена информацией между каскадами усилителя. Объединение всех усилителей в одну сеть на основе интерфейса RS-485 делает это возможным.

Как показали последующие эксперименты, аналоговый ключ DA2 не вносит дополнительных шумов. Таким образом, в представленном модуле (рис. 5) реализован один из принципов компенсации с существенным расширением функций, что является преимуществом перед схемными решениями на базе модуляторов и демодуляторов. Возникающие паразитные гармоники частоты коммутации DA2 могут быть устранены как программно, так и организацией сбора данных синхронно с частотой коммутации.

Эллиптический фильтр восьмого порядка DD1 MAX7403 установлен на выходе DA1. Частота среза контролируется MCU или внешним синтезатором частоты. Применение MCU в качестве генератора тактового сигнала имеет преимущество в том случае, если необходимо обеспечить независимую частоту среза для каждого модуля в измерительном тракте при относительно небольшом диапазоне фиксированных значений, тогда как использование внешнего синтезатора позволяет установить любую частоту среза в диапазоне

0...30 кГц. Фильтр является опциональным модулем, так как его наличие обязательно только в последних каскадах измерительного канала. Фильтр первого порядка R5C1 ограничивает полосу пропускания усилителя на частотах выше 20 кГц, что значительно уменьшает паразитные гармоники DD1 MAX7403 в области низких частот [1].

Протокол дистанционного управления. Для внешнего управления усилителем используется специальный протокол передачи данных и интерфейс командной строки. Разработка собственного протокола обоснована специфичностью решаемых задач и неоправданным использованием ресурсов MCU для большинства известных протоколов (например, ModBus-RTU). Наиболее близким к разработанному является протокол Modbus-ASCII [18]. Передаваемые данные представляются в коде ASCII, что позволяет использовать для управления любую терминальную программу. К протоколу управления предъявляются следующие требования: простота программной реализации на стороне МК; возможность обмена данными как между отдельными МК в единой сети, так и между центральным устройством (Master) и удаленным устройством (Slave) (соединение "точка-точка"); возможность наращивания и развития системы команд без применения меню; возможность работы в посимвольном, построчном и пакетном режимах; ввод-вывод в текстовом режиме; возможность использования любых терминальных программ; работа в асинхронном режиме без тайм-аутов; независимость от внешних библиотек и поддержка любых МК, имеющих встроенный модуль UART; отсутствие коллизий вследствие назначения ролей (Master, Slave) каждому устройству; работа без установления соединений; фиксированные позиции символов в заголовке кадра. Как показали предварительные эксперименты, при малых скоростях передачи данных отклонение топологии от стандарта RS-485 по каскадному или древовидному принципу не приводит к увеличению числа ошибок. Оптимизация протокола обмена и возможность передачи данных по линиям питания являются предметом отдельных исследований.

На рис. 6 показаны форматы кадров разработанного протокола. Признаком начала кадра является символ "M", после обнаружения которого модуль принимает адрес "CCC" в диапазоне 0...255. При

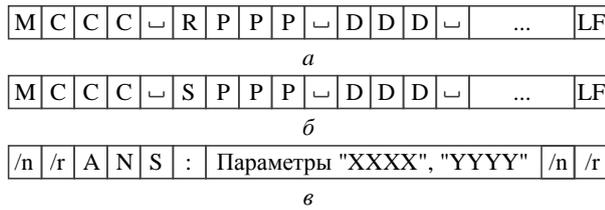


Рис. 6. Кадры передачи данных для управления усилителем

Fig. 6. Data transfer frames for amplifier control: *a* – reading a given parameter; *б* – writing a parameter; *в* – module response

совпадении адреса анализируется символ типа операции ("R" – чтение (рис. 6, *a*), "S" – запись (рис. 6, *б*)). Далее в зависимости от типа операции задается адрес параметра в диапазоне 0...255 и при операции записи значение параметра в диапазоне 0...9999. Признаком конца кадра является символ "LF". Если операция выполнена успешно, модуль формирует ответ в виде значения параметра, независимо от вида операции (рис. 6, *в*).

В случае функционирования протокола в рамках одного измерительного канала принята другая система адресации вида "MXXXX.YYYYY", где "XXXX" – адрес измерительного канала, "YYYYY" – адрес модуля в измерительном канале, определяемый по номеру каскада усиления. Всего реализовано около 30 базовых команд, с помощью которых конфигурируется любой усилитель в многоканальной системе. Заданные настройки могут быть сохранены в программируемом постоянном запоминающем устройстве МК и применены при включении питания модуля.

Результаты исследования шумовых характеристик. Результаты измерения шумов описанного прототипа усилителя представлены на рис. 7 для следующих параметров: частота среза $f_{cp} = 10$ кГц, $f_{osc} = 1$ МГц, $K_{un} = 11$, частота

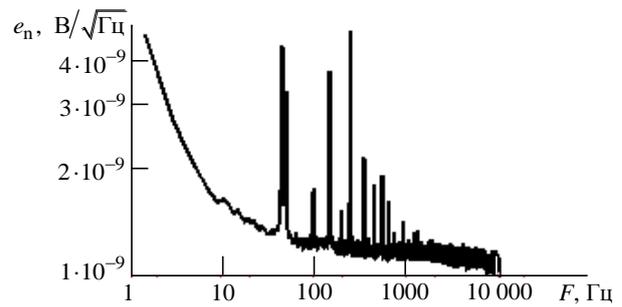


Рис. 7. Эквивалентная спектральная плотность шума напряжения малошумящего усилителя

Fig. 7. Equivalent voltage noise spectral density of the low noise amplifier

дискретизации сбора данных $F_d = 50$ кГц. Как видно из рисунка, эквивалентная спектральная плотность шума напряжения на частоте 1 кГц не превышает значения $1.2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, незначительно отличаясь от величины e_n используемого ОУ. Как показали дальнейшие измерения, это значение поддерживается при любом $5 \leq K_{un} \leq 100$.

Кроме гармоник промышленной частоты в спектре присутствует составляющая 45 Гц, являющаяся комбинационной частотой тактового генератора МК.

Заключение. Разработанный опытный образец универсального измерительного усилителя может быть использован для построения сложных многоканальных распределенных измерительных систем. Основными преимуществами усилителя являются низкий уровень собственных шумов, работа на постоянном токе, возможность дистанционного управления параметрами без значительных изменений шумовых характеристик, модульность, гибкость и простота настройки, нечувствительность к качеству питающего напряжения, большие возможности для реализации встроенных алгоритмов повышения чувствительности и снижения собственных фликкер-шумов.

Список литературы

1. Chye En Un, Ivanov V. E. Universal Multichannel System for Low Frequency Noise Measurement // Int. Siberian Conf. on Control and Communications, Astana, Kazakhstan, 29–30 June 2017. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998532
2. Instrumentation Design for Gate and Drain Low Frequency Noise Measurements / G. Giusi, F. Crupi, C. Ciofi, C. Pace // IMTC Conf. Proc., Sorrento, Italy, 24–27 Apr. 2006. P. 1747–1750. doi: 10.1109/IMTC.2006.328224

3. Dedicated Instrumentation for Single-Electron Effects Detection in Si Nanocrystal Memories / C. Pace, F. Crupi, S. Lombardo, G. Giusi // IMTC Conf. Proc., Sorrento, Italy, 24–27 Apr. 2006. P. 1856–1859. doi: 10.1109/IMTC.2006.328280
4. Automatic Measurement System for the DC and Low-F Noise Characterization of Fets at Wafer Level / G. Giusi, O. Giordano, G. Scandurra, C. Ciofi, M. Rapisarda, S. Calvi // IEEE Intern. Instrumentation and Measurement

Technology Conf. (I2MTC). Piza, Italy, 11–14 May 2015. P. 2095–2100. doi: 10.1109/I2MTC.2015.7151606

5. Dedicated Instrumentation for High Sensitive, Low Frequency Noise Measurement Systems / C. Ciofi, G. Giusi, G. Scandurra, B. Neri // *Fluctuation and Noise Lett.* 2004. Vol. 4, № 2. P. 385–402.

6. Ultra Sensitive Method for Current Noise Measurements / G. Giusi, F. Crupi, C. Ciofi, C. Pace // *Review of Scientific Instruments.* 2006. Vol. 77, № 1. P. 015107(1–5).

7. Chengqing Wei, Yong-Zhong Xiong, Xing Zhou. Test Structure for Characterization of Low-Frequency Noise in CMOS Technologies // *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement.* 2010. Vol. IM-59, № 7. P. 1860–1865. doi: 10.1109/TIM.2009.2028783

8. Scandurra G., Giusi G., Ciofi C. Multichannel Amplifier Topologies for High-Sensitivity and Reduced Measurement Time in Voltage Noise Measurements // *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement.* 2013. Vol. 62, № 5. P. 1145–1153. doi: 10.1109/TIM.2012.2236719

9. Four Channels Cross Correlation Method for High Sensitivity Current Noise Measurements / C. Ciofi, G. Scandurra, R. Merlino, G. Cannatà, G. Giusi // *Proc. of SPIE. Fluctuation and Noise.* 2007. Vol. 6600. P. 660012(1–8).

10. Configurable Low Noise Amplifier for Voltage Noise Measurements / G. Scandurra, G. Cannata, G. Giusi, C. Ciofi // 22nd Intern. Conf. on Noise and Fluctuations (ICNF), Montpellier, France, 24–28 June 2013. P. 1–4. doi: 10.1109/ICNF.2013.6578999

11. Neri B., Pellegrini B., Saletti R. Ultra Low-Noise Preamplifier for Low-Frequency Noise Measurements in

Electron Devices // *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurements.* 1991. Vol. IM-40, № 1. P. 2–6. doi: 10.1109/19.69939

12. Three-channel Amplifier for High-Sensitivity Voltage Noise Measurements / G. Giusi, F. Crupi, C. Ciofi, C. Pace // *Review of Scientific Instruments.* 2006. Vol. 77, № 1. P. 095104(1–5).

13. Giusi G., Crupi F., Pace C. Ultra Sensitive Low Noise Voltage Amplifier for Spectral Analysis // *Review of Scientific Instruments.* 2008. Vol. 79, № 1. P. 084701(1–6).

14. Ivanov V. E., Chye En Un. Simple Programmable Voltage Reference for Low Frequency Noise Measurements // *J. of Physics: Conf. Series.* 2018. Vol. 1015. P. 052011(1–5). doi: 10.1088/1742-6596/1015/5/052011

15. Иванов В. Э., Чье Ен Ун. Универсальные модули предварительной обработки для систем регистрации сигналов // *Приборы.* 2017. № 3 (201). С. 31–37.

16. Ivailo M. Pandiev. Analysis And Simulation Modeling of Programmable Circuits using Digital Potentiometers // *Intern. J. of microelectronics and computer science.* 2014. Vol. 5, № 4. P. 127–135.

17. Noise Analysis In Operational Amplifier Circuits. Application Report SLVA043B. Digital Signal Processing Solutions. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2007. 23 p. URL: <http://www.ti.com/lit/an/slva043b/slva043b.pdf> (дата обращения: 02.07.2019)

18. Modbus over serial line for legacy applications only. URL: http://www.modbus.org/docs/PL_MBUS_300.pdf (дата обращения: 02.07.2019)

Информация об авторах

Иванов Виктор Эдуардович – кандидат технических наук (2007), доцент кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного технического университета (2018). Автор 46 научных работ. Сфера научных интересов – микропроцессорные средства и алгоритмы обработки сигналов; информационно-измерительные системы.

E-mail: ivanov72@list.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0375-904X>

Чье Ен Ун – доктор технических наук (1996), профессор (1997), заведующий кафедрой автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета. Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2003), заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (2016), изобретатель СССР (1983). Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы; измерительные преобразователи, приборы, системы и технологии.

E-mail: chye@ais.khstu.ru

References

1. Chye En Un, Ivanov V. E. Universal multichannel system for low frequency noise measurement. *Int. Siberian Conf. on Control and Communications, Astana, Kazakhstan*, 2017. doi: 10.1109/SIBCON.2017.7998532

2. Giusi G., Crupi F., Ciofi C., Pace C. Instrumentation design for gate and drain low frequency noise measurements. *IMTC Conf. Proc. Sorrento, Italy*, 2006, pp. 1747–1750. doi: 10.1109/IMTC.2006.328224

3. Pace C., Crupi F., Lombardo S., Giusi G. Dedicated Instrumentation for single-electron effects detection in Si nanocrystal memories. *IMTC Conf. Proc. Sorrento, Italy*, 2006, pp. 1856–1859. doi: 10.1109/IMTC.2006.328280

4. Giusi G., Giordano O., Scandurra G., Ciofi C., Rapisarda M., Calvi S. Automatic measurement system for the DC and low-f noise characterization of FETs at wafer level. *IEEE Intern. Instrumentation and Measure-*

ment Technology Conference (I2MTC). Piza, Italy, 2015, pp. 2095–2100. doi: 10.1109/I2MTC.2015.7151606

5. Ciofi C., Giusi G., Scandurra G., Neri B. Dedicated instrumentation for high sensitive, low frequency noise measurement systems. *Fluctuation and Noise Letters*. 2004, vol. 4, no. 2, pp. 385–402.

6. Giusi G., Crupi F., Ciofi C., Pace C. Ultra sensitive method for current noise measurements. *Review of Scientific Instruments*. 2006, vol. 77, no. 1, pp. 015107–015107-5.

7. Chengqing Wei, Yong-Zhong Xiong and Xing Zhou. Test Structure for Characterization of Low-Frequency Noise in CMOS Technologies. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2010, vol. 59, no. 7, pp. 1860–1865. doi: 10.1109/TIM.2009.2028783

8. Scandurra, G. Giusi and C. Ciofi. Multichannel Amplifier Topologies for High-Sensitivity and Reduced Measurement Time in Voltage Noise Measurements. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. 2013, vol. 62, no. 5. doi: 10.1109/TIM.2012.2236719

9. Ciofi C., Scandurra G., Merlino R., Cannata G., Giusi G. Four channels cross correlation method for high sensitivity current noise measurements. *Fluctuation and Noise. Proc. of SPIE*. 2007, vol. 6600, pp. 660012-1–660012-8.

10. Scandurra G., Cannata G., Giusi G., Ciofi C. Configurable low noise amplifier for voltage noise measurements. *Noise and Fluctuations (ICNF)*. 22nd International Conference. Montpellier, France, 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICNF.2013.6578999

11. Neri B., Pellegrini B., Saletti R. Ultra Low-Noise preamplifier for low-frequency noise measurements in

electron devices. *IEEE transactions on instrumentation and measurements*. 1991, vol. 40, no. 1, pp. 2–6. doi: 10.1109/19.69939

12. Giusi G., Crupi F., Ciofi C., Pace C. Three-channel amplifier for high-sensitivity voltage noise measurements. *Review of Scientific Instruments*. 2006, vol. 77(1), pp. 095104-1–095104-5.

13. Giusi G., Crupi F., Pace C. Ultra sensitive low noise voltage amplifier for spectral analysis. *Review of Scientific Instruments*, 2008, vol. 79(1), pp. 084701-1–084701-6.

14. Ivanov V. E., Chye En Un. Simple programmable voltage reference for low frequency noise measurements. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018, vol. 1015, 052011, pp. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/1015/5/052011

15. Ivanov V. E., Chye En Un. Universal preprocessing modules for signal acquisition systems. *Pribory [Devices]*. 2017, no. 3 (201), pp. 31–37. (In Russ.)

16. Pandiev I. M. Analysis and simulation modeling of programmable circuits using digital potentiometers. *Intern. journ. of microelectronics and computer science*. 2014, vol. 5, no. 4, pp. 127–135.

17. *Noise Analysis In Operational Amplifier Circuits*. Application Report SLVA043B. Digital Signal Processing Solutions. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2007. 23 p. Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slva043b/slva043b.pdf> (accessed 02.07.2019)

18. Modbus over serial line for legacy applications only. Available at: http://www.modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf (accessed 02.07.2019)

Information about the authors

Viktor E. Ivanov – Cand. Sci. (Engineering) (1994), Associate Professor of the Department of Automation and system engineering of Pacific National University (2018). The author of 46 scientific publications. Area of expertise: microprocessor systems and signal processing algorithms; information-measuring systems.

E-mail: ivanov72@list.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0375-904X>

En Un Chye – Dr. Sci. (Engineering) (1996), Professor (1997), Head of the Department of Automation and Systems Engineering of the Pacific National University. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2003), Honored Worker of Higher School of the Russian Federation (2016), inventor of the USSR (1983). The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: information measuring systems; measuring transducers, devices, systems and technologies.

E-mail: chye@ais.khstu.ru