

ЭЛЕКТРОНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.375.4 + 537.81

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С КОМПЕНСАЦИЕЙ  
ПОСТОЯННОГО СМЕЩЕНИЯ ПО ПОСТОЯННОМУ И  
ПЕРЕМЕННОМУ ТОКАМ**

© 2026 г. М. В. Степушкин, Д. С. Калёнов\*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова*

*Российской академии наук*

*Россия, 141195, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1*

*\*e-mail: kalenov@fireras.su*

Поступила в редакцию 12.11.2025 г.

После доработки 24.11.2025 г.

Принята к печати 08.12.2025 г.

Разработан и изготовлен дифференциальный усилитель с высоким входным сопротивлением, обладающий дополнительным входом для подачи опорного сигнала, который может складываться с выходным сигналом усилителя. Это позволяет детектировать слабые изменения измеряемой величины на фоне значительного постоянного вклада. Коэффициент усиления составляет 1, 10 или 100. Прибор выполнен в виде приставки к синхронному усилителю SR830 (Standford Research Systems, USA, [www.thinkSRS.com](http://www.thinkSRS.com)), но может использоваться и с другими приборами при наличии соответствующего источника питания.

При проведении физического эксперимента нередко ситуация, когда необходимо детектировать малое изменение характеристик образца на фоне значительной абсолютной величины. В частности, при измерении продольного магнитосопротивления для тонкопленочного образца  $\text{CoPt}$ , описанного в работе [1], омическое сопротивление составило приблизительно 130 Ом, тогда как изменение, вызванное магнитным полем, – всего лишь около 0.2 Ом, т. е. 0.15%. Также в этих пленках интерес представляет детектирование отдельных магнитных доменов при помощи эффекта Холла. Однако при среднем диаметре домена 100 нм и площади креста  $25 \text{ мкм}^2$  вклад от отдельного домена составляет порядка  $10^{-4}$ . Первая проблема, которая при этом возникает, – шумы. Для борьбы с ней крайне эффективны синхронные детекторы вроде описанного в работе [2] или применяемого нами SR830. Но и им для эффективной работы требуется использование как можно большего диапазона шкалы. При наличии постоянной составляющей сигнала диапазон измерения

ограничен именно им, а на его изменение остаются те же 0.15% шкалы (на примере магнитосопротивления). Существует достаточно очевидный способ расширить шкалу измерения – вычесть из измеряемого сигнала постоянное смещение. Этим термином мы обозначили не смещение по постоянному току, а некоторый базовый уровень, относительного которого измеряемая величина меняется в ходе проведения эксперимента. В случае измерений на переменном токе, в том числе при использовании синхронных детекторов, оно равно синусоидальному опорному сигналу, отмасштабированному под характеристики конкретного образца.

Измерения зачастую проводятся на малых токах, что приводит к необходимости усиливать входной сигнал. А использование четырехзондового метода или эффекта Холла требует дополнительного вычитания одного входного сигнала из другого. Таким образом, можно сформулировать основные требования к усилителю: наличие аналогового вычитателя для дифференциальных входов, наличие аналогового вычитателя для компенсации постоянной составляющей, настраиваемый коэффициент усиления, низкий уровень собственных шумов. Также в некоторых случаях бывает необходимо проводить измерения не на переменном, а на постоянном токе. Кроме того, усилитель должен обладать высоким входным сопротивлением для возможности исследования высокоомных образцов.

Схема разработанного усилителя приведена на рис. 1. Ее основу составляет интегральный инструментальный усилитель AD8220 [3], обеспечивающий вычитание входных сигналов и возможность изменения коэффициента усиления. Возможность изменения осуществляется путем подключением одного из прецизионных резисторов обратной связи  $R_{11}$  или  $R_{15}$  при помощи герконовых реле. В случае необходимости подстройки коэффициента усиления можно добавить резисторы  $R_{10}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{16}$ ,  $R_{18}$ . Указанные на схеме номиналы обеспечивают коэффициенты усиления в 10 и в 100 раз, а когда оба реле разомкнуты, усиление равно 1. Вход опорного сигнала у всех инструментальных усилителей достаточно низкоомный, поэтому подавать на него сигнал непосредственно с делителя нельзя. Вместо этого применена схема регулируемого усилителя – инвертора на операционном усилителе TL084. Первая его часть служит входным буфером, обеспечивающим высокое входное сопротивление по входу опорного сигнала. Далее стоит масштабирующий усилитель, коэффициент усиления которого регулируется прецизионным переменным резистором  $R_{13}$  в диапазоне от  $-1$  до  $+1$  [4]. В случае, когда компенсации постоянного смещения не требуется, опорный вход  $DA_3$  соединяется с землей. Оставшиеся два усилителя TL084 используются для индикации перегрузки. Пороговые напряжения задаются резистивным делителем  $R_{19}$ ,  $R_{20}$  и  $R_{21}$ , они составляют  $\pm 5$  В. Этот блок не обязательный, и при желании TL084 можно заменить на TL082 или другой сдвоенный операционный усилитель.

**Рис. 1.** Принципиальная электрическая схема усилителя

Коммутация аналоговых сигналов осуществляется при помощи герконовых реле. В нашем случае это реле РЭС55А РС4.569.606 с напряжением срабатывания 27 В. В отличие от обычных кнопок, их контакты защищены от окисления, что позволяет минимизировать нелинейные эффекты в контактах при исследовании слабых сигналов [5]. Также это позволяет несколько сократить длину сигнальных дорожек. Переключение между измерениями на постоянном и переменном токах заключается в возможности шунтирования входных конденсаторов  $C_4$  и  $C_5$ , переключении входа сигнала смещения между входом опорного сигнала и встроенным источником постоянного напряжения, а также шунтировании выходных конденсаторов  $C_8$  и  $C_9$ . Вследствие их высокой емкости простое замыкание может быть опасным для реле, поэтому выходной резистор был разделен на два,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ , первый из которых дополнительно ограничивает разрядный ток. Также использование реле несколько улучшает эргономику: переключатель коэффициента усиления  $SW_3$  трехпозиционный, а у них среднее положение обычно соответствует полному размыканию. Если бы он использовался для выбора коэффициента усиления напрямую, без реле, он бы переключался следующим образом: 100 – 1 – 10, что неудобно при практическом использовании. Примененная схема этого недостатка лишена. Использование в качестве источника постоянного напряжения микросхемы 78L33 не является лучшим решением, и при необходимости проводить точные измерения на постоянном токе ее стоит заменить на более качественный источник опорного напряжения. Впрочем, ее выходной сигнал проходит через регулируемый усилитель и складывается с выходным сигналом без дополнительного усиления, поэтому требования к этому узлу не столь велики.

Питание на устройство подается от прибора SR830 через разъем для подключения предусилителей. Это широко распространенный DB9-F (и DB9-M со стороны кабеля), обеспечивающий двуполярное напряжение  $\pm 20$  В. При необходимости можно изготовить и отдельный блок питания. Усилитель собран в готовом алюминиевом корпусе размерами  $88 \times 38 \times 110$  мм<sup>3</sup>.

Для проверки эффективности изготовленного усилителя был собран стенд, состоящий из образца, аналогичного примененному в работе [1], помещенного между полюсами мощного электромагнита и включенного по стандартной четырехзондовой схеме. Синусоидальный опорный сигнал генерировался прибором SR830 и измерялся сначала напрямую с помощью SR830 (рис. 2а), а потом с использованием усилителя (рис. 2б). Усилитель был настроен на коэффициент усиления 100, регулировка уровня смещения установлена так, чтобы при нулевом магнитном поле выходной сигнал был минимальным. Далее были сняты зависимости продольного сопротивления образца от магнитного поля, изменявшегося от  $-1.5$  кЭ до  $+1.5$  кЭ. Из графиков при отсутствии усилителя отчетливо

видны ступеньки квантования АЦП SR830. Использование же усилителя с возможностью вычитания опорного сигнала позволяет задействовать весь динамический диапазон SR830.

**Рис. 2. а** – Зависимость абсолютного сопротивления образца от магнитного поля, измеренная без усилителя. **б** – Зависимость изменения сопротивления образца от магнитного поля, измеренная с использованием разработанного усилителя.

Основные технические характеристики следующие:

- коэффициент усиления по напряжению: 1, 10, 100;
- входное сопротивление: 100 МОм;
- входное сопротивление входа опорного сигнала: 1 МОм;
- диапазон рабочих частот: от 0 до 100 кГц;
- плотность шума, приведенного ко входу, составляет 14.3 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$  (при коэффициенте усиления 100);
- напряжение питания двуполярное: от  $\pm 18$  до  $\pm 27$  В;
- диапазон регулировки постоянного смещения по постоянному току: от  $-3.3$  В до  $+3.3$  В, по переменному току: от  $-U_{\text{оп}}$  до  $+U_{\text{оп}}$ , где  $U_{\text{оп}}$  – опорное напряжение;
- выходное сопротивление: не более 600 Ом.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Степушкин М.В., Сизов В.Е., Здоровейщев А.В., Калентьева И.Л., Миргородская Е.Н., Темирязов А.Г., Темирязева М.П.* // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66. № 7. С. 698 <https://doi.org/10.31857/S0033849421070111>
2. *Зубов В.Е., Белов И.А.* Высокочувствительный прибор для магнитооптических исследований. // ПТЭ. 2020. № 3. С. 160. <https://doi.org/10.31857/S0032816220030210>
3. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8220.pdf>
4. *Norowitz P., Hill W.* The art of electronics. Cambridge University Press, NY, 2015.
5. *Булычев А.* Герконовые реле Standex-Meder – преимущества “герметичной” коммутации. Новости электроники. 2013. №4. С. 33.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Принципиальная электрическая схема усилителя.

**Рис. 2. а** – Зависимость абсолютного сопротивления образца от магнитного поля, измеренная без усилителя. **б** – Зависимость изменения сопротивления образца от магнитного поля, измеренная с использованием разработанного усилителя.

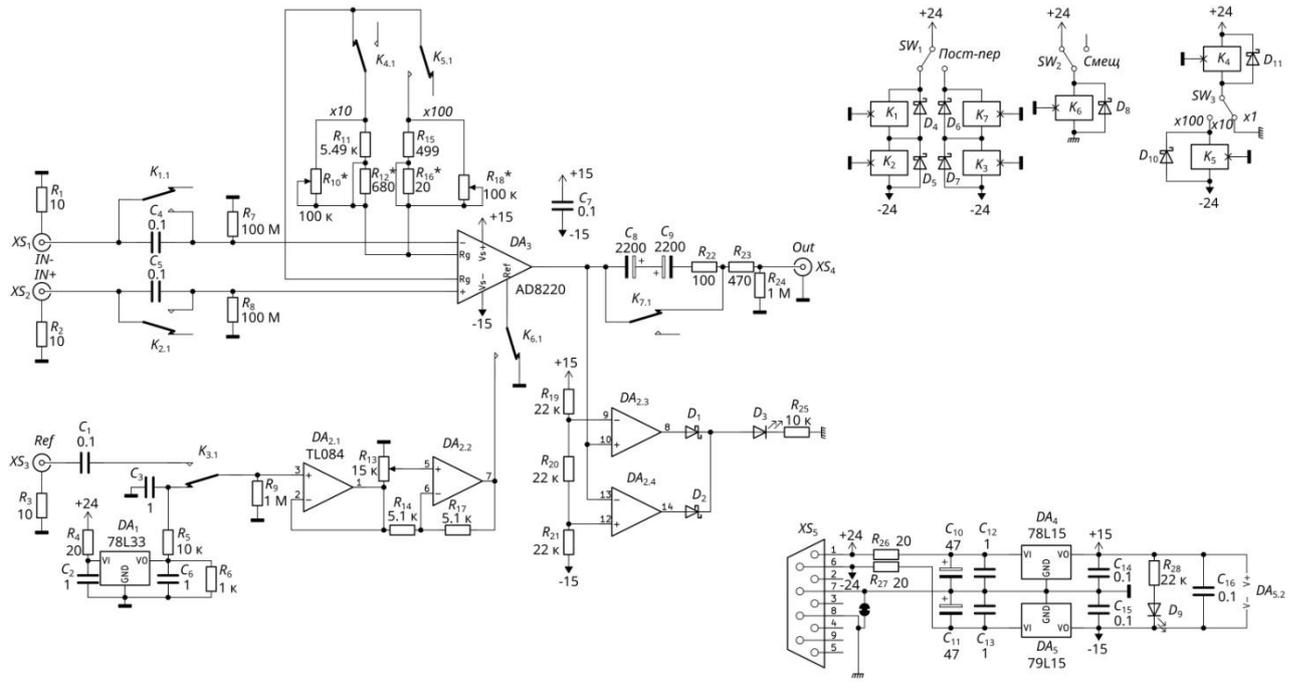
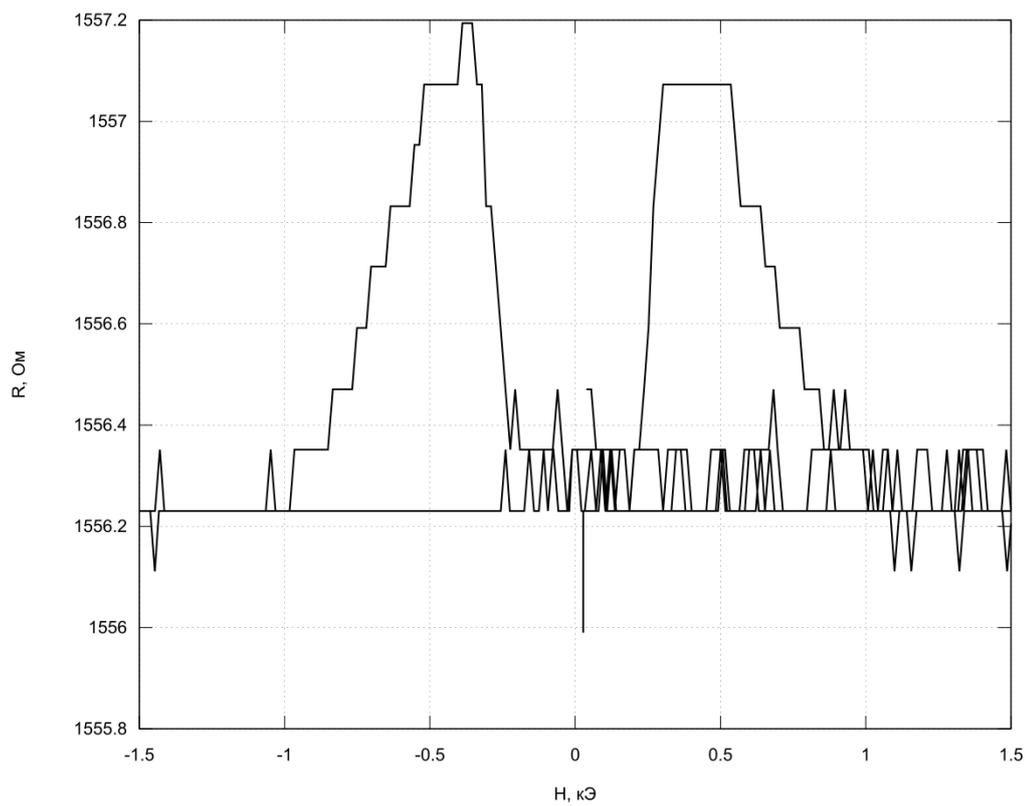
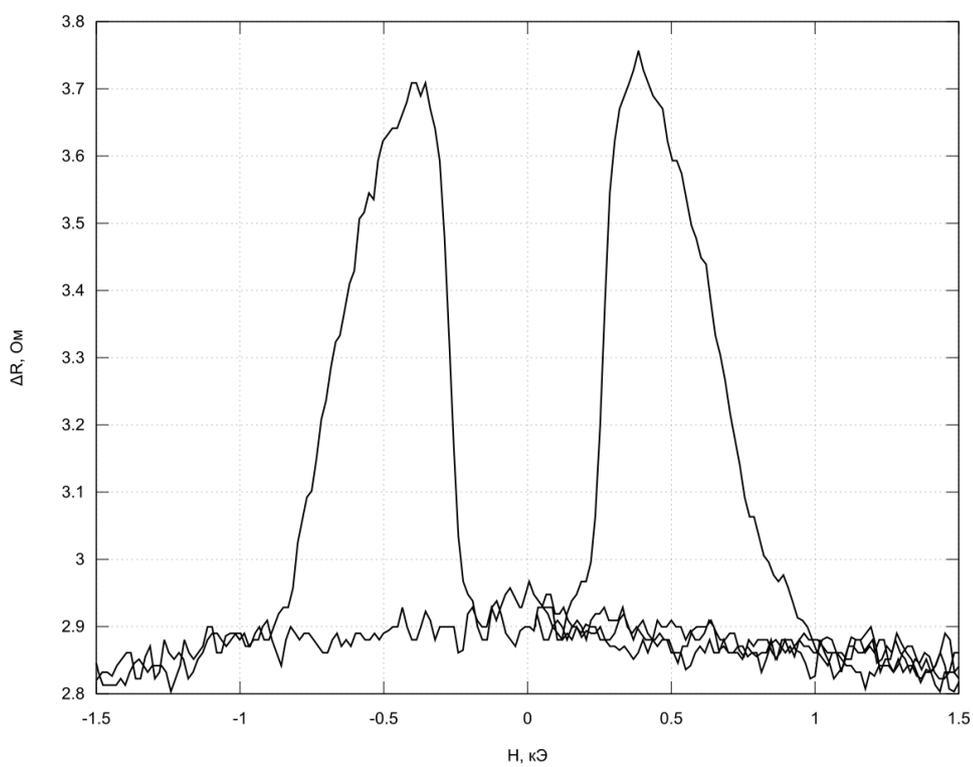


Рис. 1



(a)



(б)

**Рис. 2**