

УДК 621.375.024+53.09:537.24

**Скоморохов Алексей Александрович, Михнев Леонид Васильевич,
Бондаренко Евгений Алексеевич, Чапура Олег Михайлович,
Карачевцев Сергей Михайлович, Фролов Евгений Николаевич,
Макаров Иван Владимирович**

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МАЛЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ШИРОКОЗОННЫХ МАТЕРИАЛАХ И СТРУКТУРАХ НА ИХ ОСНОВЕ

В статье описан универсальный усилитель, который применяется при проведении широкого спектра работ, связанных с регистрацией малых сигналов тока, напряжения и заряда. Рассмотрены особенности использования режимов работы усилителя в зависимости от условий эксперимента. Приведены результаты измерения спектров фотопроводимости и фото-ЭДС образца ZnS:CuCl, временные диаграммы фототока, фото-ЭДС и зарядов, возникающих в образце под действием излучения. Показана возможность обнаружения сверхмалых постоянных составляющих фототока при включении усилителя в режим преобразования заряд-напряжение.

Ключевые слова: фотопроводимость, фототок, фото-ЭДС, фотоиндуцированная поляризация, измерительный преобразователь, операционный усилитель.

**Alexey Skomorokhov, Leonid Mikhnev, Evgeniy Bondarenko, Oleg Chapura,
Sergey Karachevtcev, Evgeniy Frolov, Ivan Makarov
SMALL SIGNAL UNIVERSAL AMPLIFIER FOR PHOTOELECTRIC
EFFECTS ANALYSIS IN MATERIALS WITH WIDE BANDGAP
AND STRUCTURES BASED ON THEM**

Article gives description of universal amplifier, which used for different tasks such as registration of small current, voltage and electric charge. We describe the specificities of application different amplifier operating modes in dependence on experimental conditions. We present results of measurements photoconductivity and photo-EMF for samples ZnS:CuCl, and time diagrams of photocurrent, photo-EMF and electric charge induced in sample under action of radiation. Detection of small constant of photocurrent are demonstrated with using universal amplifier in charge-to-voltage conversion mode.

Key words: photoconductivity, photocurrent, photo-EMF, induced polarization, measurement converter, operational amplifier.

При исследовании фотоэлектрических свойств структур, как правило, измеряют спектральные распределения и кинетические характеристики таких свойств, как фото-ЭДС, фотопроводимость [6], фототоки короткого замыкания, фотоиндуцированной поляризации и её аналогов, связанных с приэлектродными барьерами [1, 7]. Их регистрация сопряжена с измерением и визуализацией очень малых сигналов тока (десятки пикоампер) и ЭДС (десятки милливольт) имеющих в некоторых случаях нестационарное поведение и даже смену знака. Для работы с такими сигналами необходимо минимизировать собственные шумы измерительного тракта, основной частью которого является устройство усиления сигнала, и внешние наводки.

Поскольку величины Фото-ЭДС и фототока взаимосвязаны, зависят от внутреннего сопротивления исследуемой структуры и сопротивления нагрузки, и являются результатом образования некомпенсированных электрических зарядов, то в некоторых случаях имеет смысл непосредствен-

ное измерение этих зарядов. Таким образом, можно сформулировать требования к универсальному усилителю, в котором должны быть реализованы режимы повторителя напряжения (для регистрации фото-ЭДС), преобразователей «ток – напряжение» и «заряд – напряжение»:

- а) низкое выходное сопротивление;
- б) низкий уровень собственных шумов;
- в) возможность работы на частотах от 0 Гц;
- г) возможность отсечения постоянной составляющей сигнала;
- д) наличие режима логарифмического преобразования для расширения динамического диапазона;
- е) высокое входное сопротивление в режиме усиления фото-ЭДС;
- ж) низкое входное сопротивление на режимах преобразования «ток – напряжение» и «заряд – напряжение».

Наиболее полно перечисленным требованиям отвечает усилитель-преобразователь, описанный в работе [2], однако в нем отсутствует режим преобразования «заряд – напряжение». Выпускаемые промышленностью усилители с преобразованием «заряд – напряжение» [5, 11], как правило, предназначены для работы с пьезо- и пирозлектрическими датчиками и имеют ограничение частотного диапазона в области 0,1–0,3 Гц [13]. Эта особенность не позволяет осуществлять с их помощью исследование медленно протекающих процессов при фотоиндуцированной поляризации и генерации зарядов в широкозонных дисперсных материалах. Для удовлетворения вышеназванных требований, на основе ранее известной схемы [2], был разработан универсальный усилитель, электрическая принципиальная схема которого показана на рисунке 1.

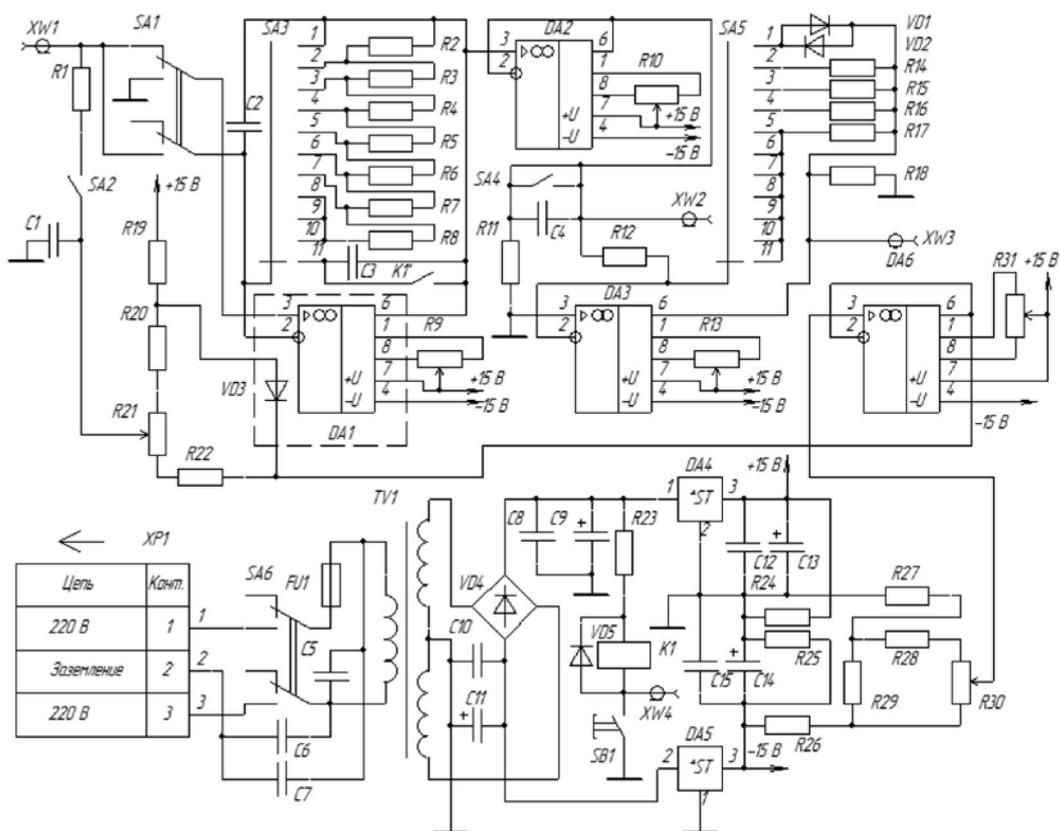


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

Усилитель содержит три каскада, построенных на интегральных операционных усилителях типа КР544УД5А. Эти микросхемы выполнены по комбинированной биполярно-полевой технологии и содержат на одном кристалле n -канальные полевые транзисторы с управляющим p - n переходом, которые обеспечивают низкий входной ток (10 пА при температуре 25 °С) и высокое входное сопротивление (1 ГОм) [8], n - p - n транзисторы и вертикальные p - n - p транзисторы, которые обеспечивают низкое выходное сопротивление, линейность и симметрию амплитудной характеристики.

Первый каскад, на микросхеме $DA1$, обеспечивает следующие режимы работы универсального усилителя:

- а) повторитель напряжения с высоким входным сопротивлением (переключатель $SA1$ в нижнем положении, $SA3$ в положении 1);
- б) преобразователь ток-напряжение (переключатель $SA1$ в исходном положении, переключателем $SA3$ в положениях 2–9 осуществляется выбор коэффициента преобразования);
- в) преобразователь заряд-напряжение (переключатель $SA1$ в исходном положении, переключатель $SA3$ в положении 11).

Операционный усилитель $DA2$ включен по схеме повторителя напряжения и обеспечивает согласование второго и третьего каскада, кроме того, он предотвращает влияние нагрузки, подключаемой к выходу $XW2$, на режим работы первого каскада.

Третий каскад на микросхеме $DA3$ может работать в следующих режимах:

- а) инвертирующий логарифмический усилитель (переключатель $SA5$ в положении 1);
- б) инвертирующий линейный усилитель с изменяемым от 1 до 500 коэффициентом усиления (переключатель $SA5$ в положениях 2–5).

Универсальный усилитель может работать в режиме усиления постоянного тока с непосредственными связями между каскадами (переключатель $SA4$ включен) или с отсечением постоянной составляющей сигнала и нижней границей частот 1 Гц (переключатель $SA4$ в исходном положении).

В режиме преобразования «заряд – напряжение» усилитель имеет низкое входное сопротивление (аналогично преобразователю «ток – напряжение») и работает по принципу интегрирования входного тока. Таким образом, при длительном наблюдении возможно обнаружение сверхмалых постоянных токов. Благодаря низкому входному сопротивлению усилитель реагирует и на быстрые изменения входного тока, что делает его основным инструментом при исследовании кинетики фотоэлектрических процессов, так как полученные в этом режиме данные дают наиболее полное представление о процессах, протекающих в образце. Для получения информации о величине и форме входного тока достаточно найти первую производную по времени при обработке результатов эксперимента.

Начальная установка (сброс) усилителя выполняется после подключения образца или перед началом эксперимента, путем замыкания накопительного конденсатора $C3$ контактами герконового реле $K1$. Сброс можно выполнить или нажатием кнопки $SB1$ на передней панели устройства, или дистанционно кнопкой, которая подключается к гнезду $XW4$.

Если при работе с постоянными токами повторителя напряжения и преобразователя «ток – напряжение», как правило, трудностей не возникает, то с преобразованием «заряд – напряжение» связана проблема поддержания выходного напряжения на постоянном уровне при отсутствии входного сигнала [10]. Причина непрерывного нарастания выходного напряжения – ток смещения операционного усилителя, который в случае регистрации малых зарядов соизмерим (а иногда и значительно превосходит) с токами, протекающими в исследуемой структуре. Кроме того, ток смещения зависит от температуры кристалла операционного усилителя, следовательно, он может изменяться в процессе работы устройства. Для устранения влияния входных токов смещения в цепь обратной связи параллельно конденсатору подключают резистор, который обеспечивает стабильность схемы по постоянному току, однако он так же ограничивает частотный диапазон [12]. Для сохранения возможности работы со сверхмалыми токами на частотах, близких к нулю, в схему был введен источник

тока смещения с температурной компенсацией. Источник смещения подключается к входу усилителя при включении $SA1$. Делитель напряжения $R26 - R30$ обеспечивает формирование и точную регулировку напряжения, пропорционального току смещения. Операционный усилитель $DA6$ включен по схеме повторителя напряжения и является источником опорного напряжения для схемы температурной компенсации. В качестве датчика температуры использован кремниевый диод $VD3$, который закреплен непосредственно на корпусе операционного усилителя с помощью эпоксидного клея для улучшения теплопередачи. Резистором $R21$ осуществляется регулировка степени температурной компенсации. Для ограничения входного тока применен резистор $R1$ с сопротивлением 1 ГОм.

Регулировка температурной компенсации осуществляется однократно после изготовления устройства или замены операционного усилителя $DA1$ с датчиком – диодом $VD3$. При изменении сопротивления исследуемой структуры (замена образца), требуется регулировка тока смещения, поэтому переменный резистор $R30$ размещен на передней панели усилителя. Нарушение режима работы является следствием того, что часть тока смещения протекает через образец, подключенный к входу $XW1$. В ходе эксперимента следует учитывать то, что появление напряжения на выходе усилителя может быть связано не только с генерацией заряда, но и с изменением сопротивления образца. Чтобы определить истинную причину появления сигнала, необходимо поменять полярность подключения ячейки к входу усилителя. Изменение знака выходного напряжения будет свидетельствовать о генерации заряда, сохранение знака – о появлении фотопроводимости в исследуемой структуре.

Источник питания усилителя – трансформаторный, выполнен по двухполярной схеме. Трансформатор имеет отвод от середины вторичной обмотки, который соединен с общим проводом. Для стабилизации напряжения питания применены интегральные линейные стабилизаторы $DA4$ и $DA5$, выходы которых нагружены на резисторы $R24$ и $R25$. Введение в схему дополнительной нагрузки позволило уменьшить влияние изменений потребляемого усилителем тока на выходные напряжения стабилизаторов.

Резисторами $R9$, $R10$, $R13$ и $R31$ осуществляется балансировка операционных усилителей, которая выполняется однократно после изготовления устройства и каждый раз в случае замены одной из микросхем.

Режим преобразования ток-напряжение в большинстве случаев используется для регистрации малых токов при измерении фотопроводимости или при подключении различных фотодатчиков с токовым выходом, например, фотодиодов, вакуумных фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей [4]. Особенно полезна в этих случаях возможность перехода в режим усиления переменного тока, что позволяет работать с сигналами, у которых постоянная составляющая тока превышает измеряемую переменную, например, при засветке фотоприемника. Усиление фототока, возникающего в широкозонных материалах, с помощью этого преобразователя осложнено тем, что схема чувствительна к высокочастотным помехам и полезный сигнал будет слабо различим на их фоне. Для уменьшения интенсивности высокочастотных помех в схему введен корректирующий амплитудно-частотную характеристику конденсатор $C2$, однако это позволило качественно выделять полезный сигнал, при работе с фототоком широкозонных материалов, лишь в немногих случаях.

Ограничивающим фактором для применения преобразователя «заряд – напряжение» является внутреннее сопротивление исследуемой структуры. При сопротивлении менее 50 МОм рекомендуется использование повторителя напряжения, так как в противном случае становится практически невозможно различить фототок и ток, связанный с фотопроводимостью. В то же время повторитель напряжения перестает работать (нарушается режим работы входного каскада операционного усилителя, повышается уровень шумов) со структурами, сопротивление которых больше 50 МОм, следовательно, в этом случае рекомендуется использование преобразования «заряд – напряжение». Таким образом, данный усилитель может быть использован для решения широкого круга задач, необходимо только выбрать режим работы в соответствии с условиями эксперимента.

На рис. 2 показаны временные диаграммы фототока и заряда на обкладках электролюминесцентного конденсатора, куда помещен образец $ZnS:CuCl$. Засветка образца осуществлялась со стороны «положительного» электрода в течение 37 секунд монохроматическим излучением с длиной волны 330 нм. Как видно из рисунка, сигнал преобразователя «заряд – напряжение» несет больше информации и не загружен шумами в отличие от сигнала преобразователя «ток – напряжение».

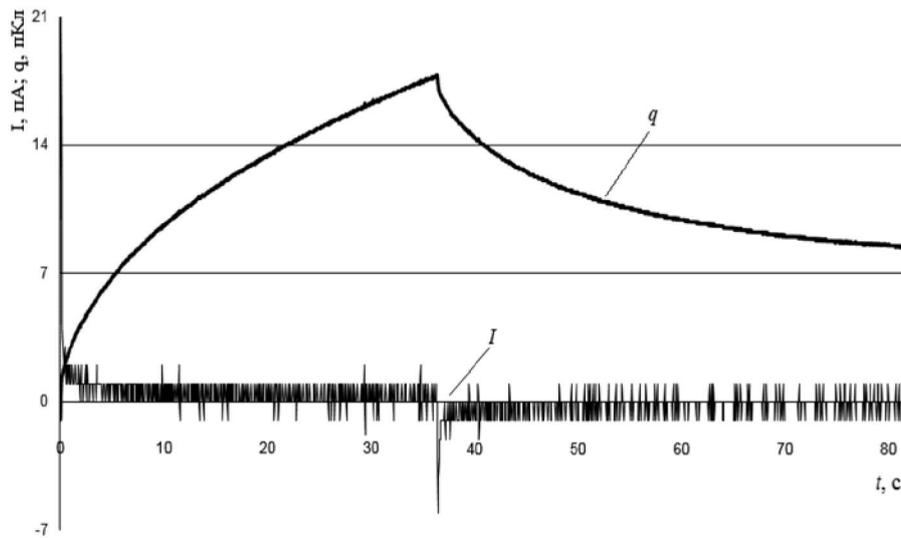


Рис. 2. Временные диаграммы фототока и заряда образца $ZnS:CuCl$, полученные в ходе эксперимента

Если в процессе обработки экспериментальных данных найти первую производную по времени от заряда, то можно получить диаграмму тока, которая показана на рис. 3. Видно, что сигнал содержит меньше высокочастотного шума, а на участке от 0 до 37 секунд (время засветки образца) стала заметна постоянная составляющая фототока, которая, вероятно, связана с наличием барьеров на границе зерен исследуемого материала и проводящих контактов ячейки [9]. Однако более наглядно протекающий ток можно оценивать по наклону участков линии заряда на рис. 2.

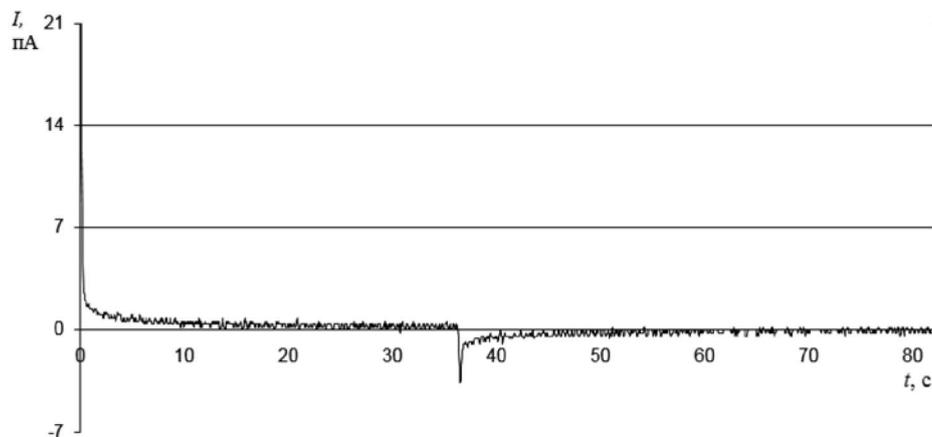


Рис. 3. Временная диаграмма фототока в образце $ZnS:CuCl$, полученная при дифференцировании кривой заряда (рис. 2)

Преобразователь «ток – напряжение», несмотря на ограниченную пригодность для регистрации фототока материалов, обладающих высоким сопротивлением, является основным инструментом для записи спектров фотопроводимости. Исследуемая структура, внешний источник напряжения и вход преобразователя «ток – напряжение» образуют последовательную цепь. Запись спектра фотопроводимости осуществляется при падающем на образец непрерывном потоке излучения. Спектр фотопроводимости, записанный с помощью преобразователя «ток – напряжение» показан на рис. 4 (кривая *S*). Также на рис. 4 показан спектр фото-ЭДС (кривая *E*), запись которого осуществлялась в режиме повторителя напряжения при модуляции потока излучения, падающего на образец. В этом случае выходной сигнал усилителя (рис. 5) подвергается селективному усилению с выделением первой гармоники и после амплитудного детектирования регистрируется с помощью цифро-аналогового преобразователя. Кривые *E* и *S*, показанные на рис. 4, точно согласуются с результатами проводимых ранее исследований [7].

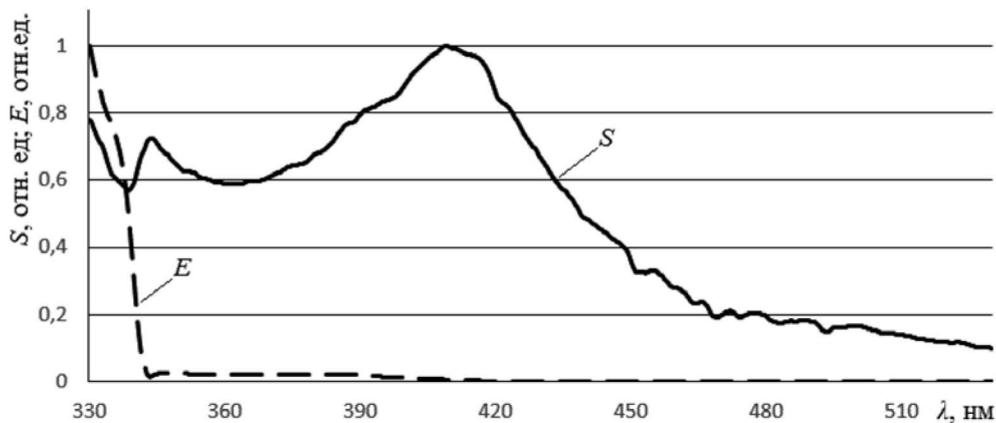


Рис. 4. Спектры фотопроводимости и фото-ЭДС образца ZnS:CuCl



Рис. 5. Временные диаграммы фото-ЭДС образца ZnS:CuCl

Как видно из рис. 5, при работе с источниками сигнала, обладающими высоким выходным сопротивлением, на входные цепи усилителя неизбежно проникают помехи, которые успешно устраняются в процессе выделения основной гармоники сигнала. При уменьшении выходного сопротивления источника сигнала снижается уровень помех, позволяя проводить запись спектров фото-ЭДС без модуляции потока излучения.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод о том, что разработанный универсальный усилитель отвечает требованиям, предъявленным к нему, и успешно используется в составе комплекса для исследования оптических и фотоэлектрических свойств широкозонных дисперсных материалов [3]. Несмотря на уникальный набор характеристик, усилитель не содержит дорогостоящих компонентов, надежен и удобен в эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания по проекту № 2014/216.

Литература

1. Блинов Л. М. Лэнгмюровские пленки // Успехи физических наук. 1988. Т. 155. С. 443–480.
2. Вакалов Д. С. Исследование люминесцентных свойств широкозонных дисперсных материалов на основе соединений ZnO и SrTiO₃:Pr³⁺, Al: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Дмитрий Сергеевич Вакалов. Ставрополь 2014. 144 с.
3. Вакалов Д. С., Крандиевский С. О., Михнев Л. В. Разработка установки для исследования люминесцентных и фотоэлектрических характеристик мелкодисперсных порошковых кристаллофосфоров // Вестник СевКавГТУ, 2011. № 4 (29). С. 6–11
4. Джексон Р. Г. Новейшие датчики: пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
5. Измерительный усилитель напряжения и заряда AP5100 [Электронный ресурс]. URL: http://globaltest.ru/page/us_izm
6. Методика измерения спектров возбуждения фотопроводимости тонкопленочных и дисперсных широкозонных материалов / Б. М. Синельников, Н. И. Каргин, Л. В. Михнев, А. С. Гусев и др. // Вестник СевКавГТУ, 2005. № 4. С. 13–19.
7. Михнев Л. В. Фото- и электровозбуждение центров свечения в дисперсных системах на основе соединений ZnS:Cu (Cl, Al) и SrTiO₃:Pr³⁺, Al: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / Леонид Васильевич Михнев. Ставрополь, 2007. 302 с.
8. Операционный усилитель с полевыми транзисторами на входе и пониженным током потребления K544UD5 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/K544UD5.pdf>
9. Синельников Б. М. Фото-ЭДС в системе SnO₂ – порошковый образец – SnO₂ и ее применение при анализе свойств соединений AIBVI / Б. М. Синельников, Н. И. Каргин, Л. В. Михнев, А. С. Гусев // Тез. докл. II Международн. науч. конф. «Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии» Кисловодск, 13–18 октября 2002 г. Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2002. С. 198–199.
10. Синюгин С. А. Интеллектуальные преобразователи: учебное пособие. Таганрог: ЮФУ, 2009 79 с.
11. Усилитель заряда ZET 440 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zetlab.ru/catalog/usiliteli-signalov-i-soglasuyushchie-ustroystva/zet-440>
12. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС / пер. с англ. М.: Мир, 1985. 572 с.
13. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.