

# МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОГО ЭФФЕКТА В КОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ.

**Исраилов Фахриддин Муродкасимович**

доцент Джизакского Политехнического института

**Аннотация:** в работе рассмотрены на основании научно-технической литературы анализ метода исследования магниторезистивного эффекта в компенсированном кремнии, а также анализ результатов теоретического и экспериментального исследования зависимости степени нелинейности напряжения при измерении фотоэлектрических свойств композитных образцов.

**Annotation:** on the basis of scientific and technical literature, the analysis of the method of studying the magnetoresistive effect in compensated silicon, as well as the analysis of the results of theoretical and an experimental study of the dependence of the degree of voltage nonlinearity when measuring the photovoltaic properties of composite samples.

**Ключевые слова:** магнитное поле, сопротивление, образец, напряжение, погрешность, электрическое поле, температура, термометр, образец, мощность.

**Keywords:** magnetic field, resistance, sample, voltage, error, electric field, temperature, thermometer, sample, power.

Собранное устройство для измерения магнитосопротивления в широком диапазоне магнитных и электрических полей показано на рис. 1. Устройство создает постоянное магнитное поле. Он состоит из электромагнита, держателя образца, системы нагрева и криостата.

Электромагнит с током до 20 А при напряжении 220 В через обмотку создает магнитное поле до 2 Тл. Для измерения магнитного сопротивления

образцов использовался метод Холла. Известно, что сопротивление образца определяется следующим выражением.

$$\rho = \frac{U_V S}{I \cdot l} \quad (1)$$

Здесь  $U_V$  — напряжение между зондами,  $I$  — ток, протекающий через образец,  $S$  — поверхность образца,  $l$  — длина образца.

Если образец поместить в магнитное поле, изменится только величина тока, протекающего через образец.

$$\frac{U_V S}{\ell} = \text{const} \quad (2)$$

Из (2) следует, что:

$$r_V = \text{const } I_B \quad (3),$$

где  $I_B$  — удельное сопротивление образца в магнитном поле.

В отсутствие магнитного поля  $r_0$  определяется тем же выражением:

$$r = \text{const } I \quad (4)$$

где  $r$  — удельное сопротивление образца без магнитного поля,

$I$  — ток, протекающий через образец без магнитного поля.

Магнитное сопротивление образцов выражается следующим образом:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho_B - \rho}{\rho} \quad (5)$$

Если (2) и (3) заменить на (4), получится магнитное сопротивление образцов, выраженное через протекающий ток:

$$\frac{\rho_B - \rho}{\rho} = \frac{I - I_B}{I_B} \quad (6)$$

где:  $\rho_B$  удельное сопротивление образца в магнитном поле

$\rho$  удельное сопротивление образца без магнитного поля;

$I_B$  — ток, протекающий через образец в магнитном поле;

$I$  — ток, протекающий через образец без магнитного поля.

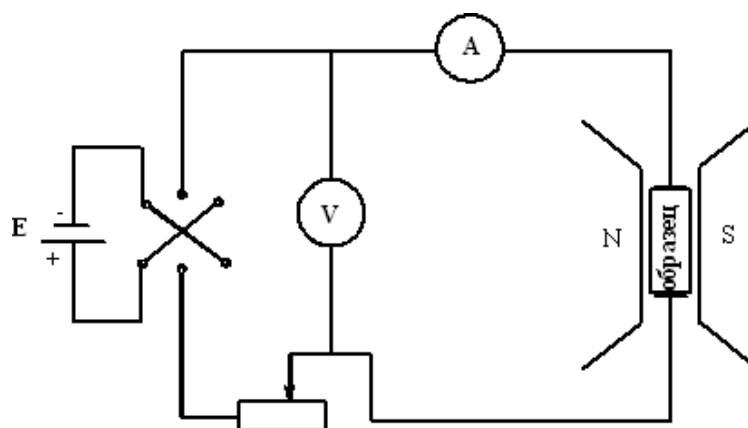


Рис.1. Вид устройства, используемого для измерения магнитосопротивления в широком диапазоне магнитных и электрических полей.

### **Измерение фотоэлектрических свойств композитных образцов.**

Образцы композита исследовали на установке ИКС-21, оснащенной специальным криостатом, позволяющим исследовать спектральную зависимость фотопроводимости (ФП) в электрическом поле ( $E = 0,1-50$ ) В/см в широком диапазоне температур (77-350)К., фоновое освещение

( $J = 0,1-1000$  лк) осуществлялось при разной интенсивности с помощью лампочки (рис.2).

Интенсивность фона освещения контролировали с помощью калибровочных кривых. Температуру измеряли с помощью медно-константановой термопары, которую помещали под образец в криостате. Интенсивность монохроматического света, у  $J = 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>, поддерживалась постоянной при изучении спектральной зависимости ФП и при необходимости изменялась с помощью калибровочных стержней, помещаемых между глобаром и окном ИКС-21. Практически все фотоэлектрические исследования проводились с двойным фильтром из полированных кремниевых пластин толщиной  $d = 0,5$  мм, размещенным перед окном ИКС и перед окном криостата, для получения достоверной информации о спектральной зависимости ФП в диапазоне  $h\nu = 0,2-1,0$  требовало применения двойного фильтра [1].

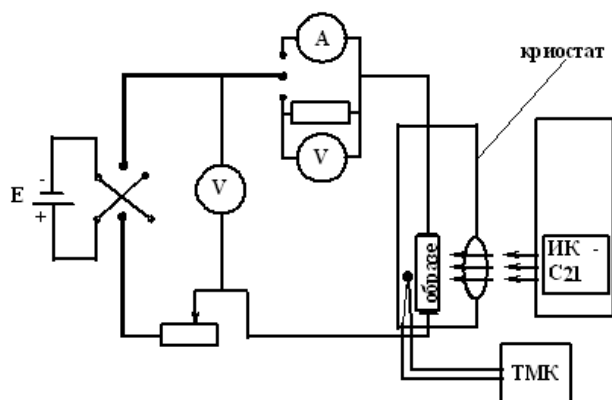


Рис.2. Устройство для измерения спектральной фотопроводимости.

### **Вольтамперные характеристики разработанных композиционных датчиков температуры.**

При анализе классификации обобщенных приемов показывает, что наибольшее количество обобщенных приемов совершенствования конструкций разработана с целью уменьшения погрешности, обусловленной воздушным зазором, так как эта погрешность является наибольшей по величине и по существу определяет значение суммарной погрешности трансформаторных преобразователей механических напряжений. Процесс, происходящий в преобразователе, может быть представлен в виде совокупности элементарных преобразований одной физической величины в другую, каждое из которых является в первом приближении линейной зависимостью [2,3].

Анализ классификации обобщенных приемов показывает, что наибольшее количество обобщенных приемов совершенствования конструкций разработана с целью уменьшения погрешности. Для уменьшения погрешности преобразования необходимо обеспечение максимума параметра  $R_{\mu k}$  [4,5]

Из-за чувствительности к высоким температурам изготовленные композитные датчики температуры значительно облегчат работу, если их

использовать в качестве аксессуаров. В этом случае сигнал может быть отправлен непосредственно регистратору устройств. Это повышает надежность и снижает стоимость датчика температуры. Аналогом разработанного композитного датчика температуры является ООО «ВЗ СЕНСОР» Института проблем управления РАН.

А также могут быть присоединены умные (функциональные) Z-термисторы (Z-термисторы), разработанные на основе полупроводниковых конструкций. Г-образная вольт-амперная характеристика способна решить задачу подбора определенных значений температуры без использования дополнительных электронных схем.

На рис.3 представлены ВАХ разработанного композитного датчика температуры. Следует отметить, что ВАХ композиционных датчиков температуры, выполненных на основе материалов  $\text{Si}\langle\text{B,S}\rangle$ ,  $\text{Si}\langle\text{P,Ni}\rangle$ , но имеющих одинаковое удельное сопротивление, подобны друг другу. При малом токе и напряжении характеристика ВАХ линейна вне зависимости от номинального сопротивления датчика температуры и удельного сопротивления материала, из которого он изготовлен. В составном термодатчике появляется нелинейность из-за саморазогрева термодатчика по мере увеличения рассеиваемой мощности. Обычно при измерении температуры датчик температуры располагается в линейной части ВАХ, и нормировать режим работы составного датчика температуры проще электронным способом. Поэтому важно знать, при каких условиях реализуется режим работы. Нелинейность возникает из-за рассеивания тепла в составном датчике температуры, поэтому чем меньше ток и напряжение на датчике температуры (т. е. чем меньше потребляемая мощность), тем более линейным будет датчик температуры. На рис.3 ВАХ разработанного композитного датчика температуры представлены данные, полученные в безвоздушной, герметичной и безвоздушной герметичных средах. Без герметизации неравномерность начинается с 0,36 мВт потребляемой

мощности, то есть распределение мощности на графике становится нелинейным (нелинейность в ВАХ при этой мощности составляет 2%).

Нелинейность датчика температуры в герметично закрытом состоянии начинается с 3,2 мВт. Если датчик температуры работает в более теплопроводной среде, например, в жидкости, то эти силы возрастают. Наличие токовых потоков также приводит к увеличению рассеиваемой потребляемой мощности.

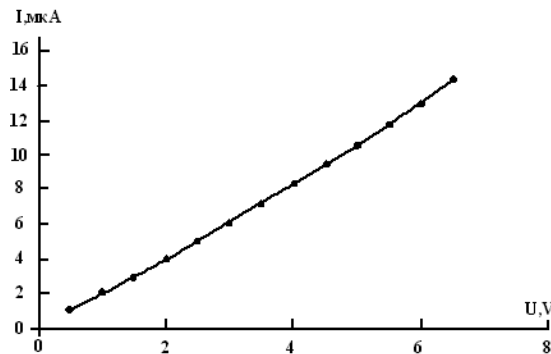


Рис.3. Вольтамперная характеристика составных датчиков температуры, разработанная при  $r = 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

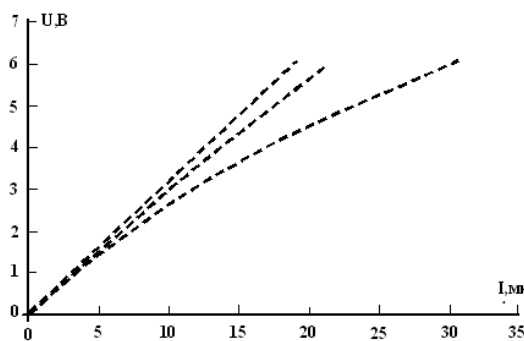


Рис.4.  $n\text{-Si}\langle S \rangle s=10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$  на основе вольтамперметрической характеристики композитных датчиков температуры при комнатной температуре . 1 – линейный ВАХ; 2 – негерметичные датчики температуры для ВАХ; ВАХ для 3-х герметичных датчиков температуры.

### Тепловая инерция разработанного композитного датчика температуры.

Тепловая инерция составного датчика температуры показывает, насколько быстро или медленно датчик температуры достигает теплового равновесия с окружающей средой. Инерционность (или быстрдействие) составного датчика температуры зависит от многих факторов:

теплопроводности среды, теплопроводности наполнителя, наличия токов в среде, разности температур между помещенным в среду датчиком температуры и температуры теплоемкости (масса) самой среды.

Тепловая инерция определялась быстрым перемещением композитного датчика температуры из одной среды в другую при отсутствии токов в среде. Так, датчик температуры размером  $1 \times 1 \times 0,5$  мм при переносе из открытого помещения температурой  $T=25^{\circ}\text{C}$  в воду температурой  $T=75^{\circ}\text{C}$  без герметизации, датчик температуры достигает равновесия с окружающей средой за 9 с (время постоянная  $4^{\circ}\text{C}$ ), из воды при  $T=40^{\circ}\text{C}$  (время постоянная  $12^{\circ}\text{C}$ ) и при  $T=75^{\circ}\text{C}$  за 50 с (время постоянная  $20^{\circ}\text{C}$ ) при реверсировании. Покрытие датчика температуры нитролаком не изменило эти значения. После закрытия эти времена увеличились в 2-3 раза. При наличии токов в окружающей среде скорость датчика температуры увеличивается.

Разработанный композитный датчик температуры легко монтируется на объекте в отверстии диаметром около 2 мм. Для снижения термостойкости зазор между датчиком и теплопроводом заполнен теплопроводной пастой КТП-8. При погружении датчика температуры в жидкий азот, нагретый до  $250^{\circ}\text{C}$  ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), время отклика на изменение температуры не превышает 4 секунды.

#### **Диапазон рабочих температур композитных датчиков температуры.**

Технологически удобным соединением для изготовления композитного датчика температуры является марганец (Mn). При его использовании время диффузии, которое нужно для сплава, чтобы изготовить датчик температуры, невелико. Однако диапазон рабочих температур для образцов композитов  $\text{Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$  ограничен, он находится в пределах от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ . Верхняя граница этого диапазона ограничена началом распада атомов марганца. Это составляет температуру свыше  $100^{\circ}\text{C}$ .

Легирующего соединения имеют более сложные условия для диффузии из-за низкого коэффициента диффузии атомов серы (S) в кремнии (Si) по

сравнению с коэффициентом диффузии атомов марганца (Mn), но диапазон рабочих температур образцов композита Si<B,S> в более широком диапазоне от -200°C до +200°C.

Композиционные датчики температуры из никелевого сплава на основе кремния (Si) требует применения вакуумного оборудования, которое дорого и сложно в обслуживании и эксплуатации, что в конечном итоге приводит к удорожанию технологического процесса и удорожанию температуры. Однако, время диффузионного легирования никелем значительно меньше, чем серой. Диапазон рабочих температур образцов Si<P,Ni> составляет от -200°C до +250°C.

Диапазон рабочих температур разработанного композитного датчика температуры составляет от -60°C до +110°C. Здесь нижний предел определяется температурными характеристиками кристалла кремния и пленки никеля. Напыление никеля производят при температуре около 100°C, при очень низких температурах из-за неравенства коэффициентов термического расширения с кремния снимается пленка никеля. Верхний температурный предел определяется температурой плавления шипа. Температура плавления предохранителя ПОСК 50/18 150°C (при использовании предохранителя ПОС 61 верхний предел увеличивается до 180°C). Температурная чувствительность разработанных композиционных термореле остается постоянной во всем диапазоне рабочих температур.

На основе комплексного изучения состояния и электрофизических свойств монокристаллов кремния p- и n-типа, легированных фосфором и бором и дополнительно легированных атомами серы и никеля, определены оптимальные условия создания необходимых уровней в запрещенной области Si для увеличения, определены чувствительность и быстродействие композитных датчиков температуры на основе кремния. Как показано в главах 2 и 3, дополнительное легирование кремния атомами S и Ni приводит к увеличению времени жизни неосновных носителей на 50%, что приводит к



увеличению быстродействия датчика температуры и увеличению его радиационной стойкости. Высокочувствительные композиционные датчики температуры изготавливаются с использованием разработанного нового метода сплавления атомов никеля и серы с монокристаллами кремния методом постепенной диффузии. Составные датчики имеют следующие размеры: 1,5x1,5x0,5 мм, контакты 0,1 мм выполнены из медных проводников диаметром 1,5 мм. Композитные датчики температуры привариваются

к никелевым контактам, подводимым к контактными поверхностям, методом предварительного вакуумного напыления.

Преобразователь – устройство, которое преобразует изменения входной величины в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшего использования, и служит воспринимающим органом ряда элементов [6]. Составные датчика температуры (сопротивление  $\rho$ , температурная чувствительность  $B$ , диапазон измеряемых температур, габариты) представлены в таблице 1. Скорость перемещения разработанных композитных датчиков температуры составила 10-15 секунд. Композитные датчики температуры по своим параметрам намного лучше существующих аналогов.

Составная температурная характеристика составных датчиков температуры на основе  $n\text{-Si}$   $r=10^5$  Ом·см<sup>2</sup> показано на рис.5. После выбора оптимального состава и технологии нанесения смеси тепловая инерция датчиков температуры не превышала 4 секунд.

Таблица 1.

Параметры композитных датчиков температуры на основе материала  $\text{Si(P,Ni)}$

Нет.	$\rho$ , Ом·см	$B$ , К	$T$ , К	Размеры, мм
1	$3 \cdot 10^2$	4600	77 ÷ 200	1x1x0,5

2	$3 \cdot 10^3$	6250	120 ÷ 250	1x1x0,5
3	$2 \cdot 10^4$	7000	150 ÷ 300	1x1x0,5
4	$10^5$	7200	200 ÷ 370	1x1x0,5
5	$6 \cdot 10^5$	7300	250 ÷ 400	1x1x0,5

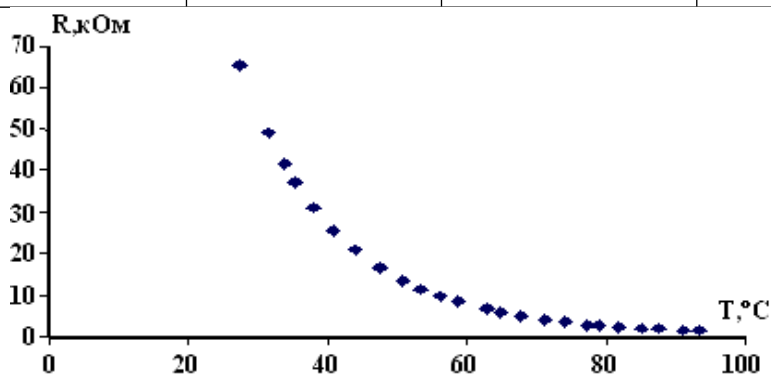


Рис.5. Температурные характеристики композитных датчиков температуры

Композитные датчики температуры на основе Si<P,Ni> составляет от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ . Диапазон рабочих температур композитных датчиков температуры, изготавливаемых для широкого применения на практике, находится в диапазоне  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+110^{\circ}\text{C}$ . Композитные термодатчики остаются постоянными во всем диапазоне рабочих температур.

Разработаны композитные датчики температуры нанокластеров никеля на основе кремния со следующими эксплуатационными характеристиками:

- 1) максимальное значение коэффициента температурной чувствительности,  $V=6600$  град $^{-1}$ ;
- 2) скорость 10 секунд;
- 3) диапазон измеряемых температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $120^{\circ}\text{C}$ , где во всем диапазоне  $U_{\text{пр}}=f(T)$  является линейным;
- 4) размеры 1x1x0,5 мм;
- 5) температурная чувствительность  $3,0$  мВ.К $^{-1}$ ;
- 6) ток от 1 мА до 100 мА;

- 7) погрешность  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ;
- 8) радиационная стойкость  $10^9 \text{ P}$ ;
- 9) устойчив к механическим вибрациям до 350 Гц.

В табл.1. сравниваются характеристики датчиков температуры, полученных методами низкотемпературной диффузии атомов серы и никеля и имплантации ионов фосфора и бора в монокристалл кремния в разных направлениях. Как видно из таблицы, лучшими свойствами обладают датчики температуры с нанокластерами атомов никеля, внедренными в кремниевую основу. Кроме того, их характеристики устойчивы к воздействию  $\gamma$ - и нейтронного излучения, к вибрациям. Достоинствами разработанных датчиков являются их очень малые размеры, простота изготовления и достаточное быстродействие. Технология изготовления таких датчиков не требует дорогостоящего оборудования, в отличие от датчика на основе  $\text{pin}$ -диода, не требует для своего изготовления высоковакуумного устройства и установки для ионных пучков и ионного сплавления. Кроме того, методом имплантации ионов никеля не удастся добиться равномерного распределения примеси по глубине в объеме кремния, что не позволяет создавать чувствительные датчики температуры путем диффузии атомов никеля в кремний при низкой температуре. .

Таблица 2.

Композитные датчики температуры, полученные низкотемпературной диффузией  $\text{Si}\langle\text{B,S}\rangle$ ,  $\text{Si}\langle\text{B,Ni}\rangle$ ,  $\text{Si}\langle\text{P,Ni}\rangle$  и ионной имплантацией (пин-диод) сравнение производительности.

Тип термо-датчика	Сопротивление	Диапазон измерения температуры $^{\circ}\text{C}$	Температурный Коэффициент	Температура чувствительности	Быстродействие сек
$\text{Si}\langle\text{B,S}\rangle$		-200÷180	2,1 мВ $\text{K}^{-1}$	4500	25
$\text{Si}\langle\text{B,Ni}\rangle$	$6 \cdot 10^5$	-200÷250	2,2 мВ $\text{K}^{-1}$	7000	10
$\text{Si}\langle\text{P, Ni}\rangle$	$10^5$	-200÷250	3,0 мВ $\text{K}^{-1}$	7200	5-15

(пин-диод)		-250÷250	2,3 мВ К <sup>-1</sup>		20
------------	--	----------	------------------------	--	----

Количественной характеристикой измеряемых величин является размер. Качественной характеристикой величин - ее размерность. Последняя обозначается символом *dim* от латинского слова «dimension», которое переводится как размер и как размерность в зависимости от контекста [7].

Следует отметить, что прямому использованию при измерениях имеются следующие факторы [8]:

- оценка измерений в испытательных и калибровочных лабораториях;
- применение специально сертифицированных программных средств для измерения;
- получения данных неопределенности измерений путем существующими программными средствами;
- документирование пошаговой процедуры.

### **Выводы**

Исследованы температурные показатели композиционных образцов композиционного материала Si<B,S>Si<B,Mn>, Si<B,Mn,S>, Si<P,Ni>, компенсированного кремнием .

Температурный коэффициент сопротивления и температурный коэффициент композиционного материала в интервале температур от -60°C до +90°C для Si<B,S> Si<B,Mn>, Si<B,Mn,S>. Для образцов PNi> исследована температурная зависимость коэффициента чувствительности.

### 3. Кремниевая компенсация Si<B,S> Si<B,Mn>, Si<B,Mn,S>, Si<P,Ni>

Композитные датчики температуры изготовлены на основе композиционных материалов.

4. На основе полученных композитных датчиков температуры разработан электронный термометр с использованием аналого-цифрового преобразователя.

5. Эргономические показатели, характеризующие систему «человек - изделие - среда», устанавливают соответствие свойств изделия тем или иным свойствам человека [9].

#### **Использованная литература:**

1. Муродкосимович И. Ф., Ганишерович Б. А. и Суннатиевич А. Б. (2021). СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ. Международный инженерный журнал исследований и разработок, 6 (ICDSIII), 5-5.

2. Мухаммадиев Б. С. УЛУЧШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ //Proceedings of International Conference on Modern Science and Scientific Studies. – 2023. – Т. 2. – №. 6. – С. 196-204.

3. Мухаммадиев Б. С. СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ДИСКРЕТНЫМ ВЫХОДОМ //SO ‘NGI ILMIY TADQIQOTLAR NAZARIYASI. – 2023. – Т. 6. – №. 6. – С. 286-293.

4. Мухаммадиев Б. С. ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ НАКЛАДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ //E Conference Zone. – 2022. – С. 198-202.

5. Мухаммадиев Б. С., Эшонкулова М. Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ДИСКРЕТНЫМ ВЫХОДОМ //Экономика и социум. – 2021. – №. 11-2 (90). – С. 207-211.

6. Мухаммадиев Б. С. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАКЛАДНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ДИСКРЕТНЫМ ВЫХОДОМ //Proceedings of International Conference on Scientific Research in Natural and Social Sciences. – 2023. – Т. 2. – №. 6. – С. 154-162.

7. Шертайлаков Г. М., Уралов Г. А. Поверка средств измерения //Техника. Технологии. Инженерия. – 2018. – №. 2. – С. 6-8.

8. Абдурахманов А. А. РОЛЬ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ //Экономика и социум. – 2021. – №. 10 (89). – С. 388-390.

9. Ungarov D. Y., Shertaylakov G. M. IT IS THE MAIN GUARANTEE OF CONSUMER RIGHTS PROTECTION TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF INTERNATIONAL STANDARD REQUIREMENTS //INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE " INNOVATIVE TRENDS IN SCIENCE, PRACTICE AND EDUCATION". – 2023. – Т. 2. – №. 2. – С. 103-106.