

УДК:628.34.001.57

Холматов У.С., доцент кафедры «Транспортная логистика», Андижанский государственный технический институт, г. Андижан, Республика Узбекистан, E-mail: umid.xolmatov.76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2295-502X>

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПОЛЫМИ И ВОЛОКОННЫМИ СВЕТОВОДАМИ

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы оптоэлектронных дискретных преобразователей (ОДП) любого типа - продольного или поперечного перемещения внешнего модулирующего тела (ВМТ). В связи с развитием таких важных отраслей экономики, как машиностроение, металлургия, нефтегазовая, химическая, промышленная, строительная, пищевая промышленность и других, актуально их оснащение современными дискретными преобразователями перемещения, позволяющими контролировать и управлять такими важными величинами, как уровень жидкости, скорость и расход потоков газов и жидкостей, а также автоматизировать процессы автоматического учета штучных изделий, продукции, товаров, заготовок и полуфабрикатов, что позволяет объективно анализировать хозяйственную деятельность предприятий и планировать их дальнейшее развитие.

Ключевые слова: источника излучения, приемника излучения, измерительной схемы, световод, волоконные световоды, операционные усилители.

Введение. Статическая характеристика ОДПВ является зависимостью в установившемся состоянии между значениями входного $X_{вх}$ и выходного $X_{вых}$ сигналов. Особенностью конструкций ОДПВ является наличие следующих основных элементов: источника излучения (ИИ); приемника излучения (ПИ); световода (полого или волоконного) (СВ); измерительной схемы (ИС) с формирователем выходного сигнала, которые в зависимости от принципа построения ОДПВ соединены определенным образом для выполнения необходимой функции преобразования. На основе вышеизложенного можно констатировать, что статическая характеристика любого ОДПВ определяется параметрами всех указанных элементов и в дальнейшем анализ статических характеристик ОДПВ будет осуществляться как с учетом их математических моделей, так и видом измерительных схем [1, 2, 5, 6].

Методы. В ОДПВ релейного типа промежуточный непрерывный сигнал (рис.1, а) преобразуется в выходной дискретный сигнал (рис.1, б).

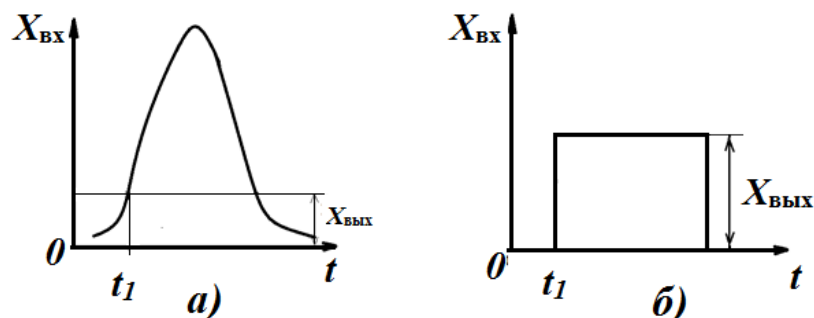


Рис.1. Дискретные сигналы релейного типа.

В ОДПВ импульсного типа входные сигналы преобразуются в последовательности импульсов (рис.2).

В ОДПВ сигнал аналого-цифрового типа преобразуется в выходной цифровой сигнал на основе геометрического кодирования.

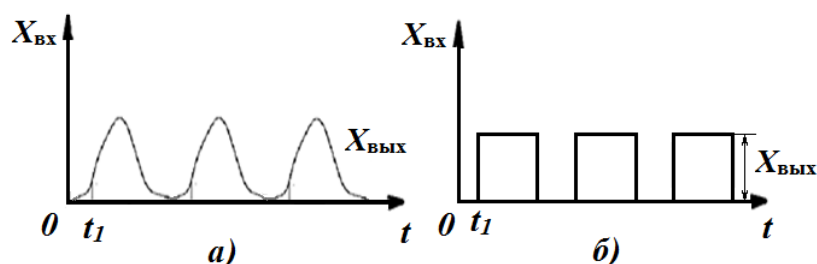


Рис.2. Дискретные сигналы импульсного типа.

Таким образом, статическая характеристика ОДПВ определяется последовательным преобразованием входной величины в непрерывный сигнал последующим преобразованием в соответствующий дискретный сигнал. Для формирования статической характеристики ОДПВ существенную роль играют измерительные схемы в виде делительных или мостовых схем [3, 4, 7, 8] в плечи которых включаются различные приемники излучения: фоторезисторы, фотодиоды, и другие. Например, в мостовой измерительной схеме рис.3 в, одним из основных плеч является фоторезистор с сопротивлением $R_{фр1}$, а в другое плечо (смежное) обычно включается компенсационный фоторезистор $R_{фр2}$ для компенсации различных внешних неинформативных воздействий (например,

изменения температуры окружающей среды, фоновые засветки и другие). В другие плечи мостовой измерительной схемы включены постоянные электрические сопротивления R_3 и R_4 [9, 10, 13, 14]

Для получения стандартного выходного сигнала в измеряемом диапазоне в виде электрического тока от 0 до 5 мА или в виде электрического напряжения от 0 до 2 В выход мостовой схемы подключен на вход операционного усилителя ОУ [11, 12].

Для расчета выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ мостовой схемы (рис.3, в) используется формула

$$U_{\text{вых}} = U_M \frac{R_{\text{фр1}} R_4 + R_{\text{фр2}} R_3}{[R_{\text{фр1}} + R_{\text{фр2}}](R_3 + R_4)}, \quad (1)$$

где: U_M – напряжение питания мостовой схемы.

В исходном состоянии измерительная схема находится в равновесии ($U_{\text{вых}}=0$), так как $R_{\text{фр1}} = R_{\text{фр2}} = R_{\text{фр3}} = R_{\text{фр4}}$. При перемещении внешнего модулирующего тела происходит перераспределение светового потока, что приводит к изменению значения $R_{\text{фр1}}$. Если $R_{\text{фр1}}$ изменится на величину $R_{\text{фр1}} \cdot \varepsilon_1$, то формулу (1) можно переписать в виде:

$$U_{\text{вых}} = U_M \frac{R_{\text{фр1}}(1 + \varepsilon_1) + R_{\text{фр2}} R_3}{[R_{\text{фр1}}(1 + \varepsilon_1) + R_{\text{фр2}}](R_3 + R_4)}, \quad (2)$$

где: $\varepsilon_1 = \Delta R_{\text{фр1}} / R_{\text{фр1}}$ – относительное изменение сопротивления плеча $R_{\text{фр1}}$;

$$\Delta R_{\text{фр1}} = R_{\text{фр1}}(x) - R_{\text{фр1}}(x = 0)$$

Значения сопротивлений $R_{\text{фр1}}(x)$ определяются по характеристике $R_{\text{фр1}} = f[\Phi_0(x)]$ для конкретных конструкций ОДПВ с учетом изменений $\Phi_0(x)$ при перемещении внешнего модулирующего тела [15, 16].

Выражение (2) можно преобразовать путем деления последовательно на $R_{\text{фр2}}$ и R_4

$$U_{\text{вых}} = U_M \frac{K \varepsilon_1}{(K + 1)(K + 1 + K \varepsilon_1)}, \quad (3)$$

где: $K = R_{\text{фр1}} / R_{\text{фр2}} = R_3 / R_4$ – коэффициент симметрии мостовой измерительной схемы.

При относительно небольших изменениях сопротивления $R_{\text{фр1}} (\varepsilon_1 \ll 1)$ выражение статической характеристики можно представить в виде

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{М}} \frac{K \varepsilon_1}{(K + 1)^2} \quad (4)$$

Аналогично для делительной схемы (рис.1, а) выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, если R_1 является сопротивлением приемника излучения (фоторезистора или фотодиода) равно:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{М}} \cdot K \varepsilon_1}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

При изменении $\Phi_0(x)$ сопротивление приемника излучения изменится на $R_1 \varepsilon_1$ и станет равным $R_1(1 + \varepsilon_1)$, что приводит к изменению $U_{\text{вых}}$

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{М}}}{R_1(1 + \varepsilon_1) + R_2} R_1(1 + \varepsilon_1) - \frac{U_{\text{М}} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

или

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{М}} \frac{k \varepsilon_1}{(k + 1)(k + 1 + k \varepsilon_1)}, \quad (7)$$

что аналогично выражению (3), то есть формулы для мостовой и делительной схем одинаковы.

Если в плечи делительной или мостовой схем при дифференциальной конструкции ОДПВ включаются два приемника излучения, при этом при воздействии входной величины $x_{\text{вх}}$ сопротивление одного плеча, например R_1 будет увеличиваться и станет равным $R_1(1 + \varepsilon_1)$ и сопротивление плеча R_2 уменьшится и будет равным $R_2(1 + \varepsilon_2)$, то формула выходного напряжения примет вид (рис.3, в):

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{М}} \frac{k}{(k + 1)} \cdot \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{k + 1 + k \varepsilon_1 - \varepsilon_2}, \quad (8)$$

при $k \approx 1$; $\varepsilon_1 \ll 1$ и $\varepsilon_2 \ll 1$ можно записать

$$U_{\text{вых}} = U_M \frac{k}{(k+1)^2} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (9)$$

Результаты и обсуждение Анализ характеристик мостовых схем показывает, что с точки зрения нелинейности, наиболее предпочтительны схемы с двумя и с четырьмя приемниками излучения в плечах схем (рис.3, г).

В связи с тем, что рассматриваемые ОДПВ используются в приборах со встроенными микропроцессорами для согласования выхода ОДПВ с микропроцессором необходима предварительная обработка выходного сигнала: усиление, преобразование выходного напряжения, подавление помех и другое [17, 18].

Одним из важнейших элементов предпроцессорной обработки сигналов ОДПВ являются операционные усилители ОУ (рис.3, г). При этом с помощью операционных усилителей эффективно осуществляется повышение чувствительности статических характеристик ОДПВ и дальнейшее преобразование в дискретную форму.

Для дальнейших расчетов необходимо определить относительные значения ε_1 в зависимости от изменения суммарного светового потока $\Phi_0(x)$, падающего на приемник излучения преобразователя [19, 20, 21].

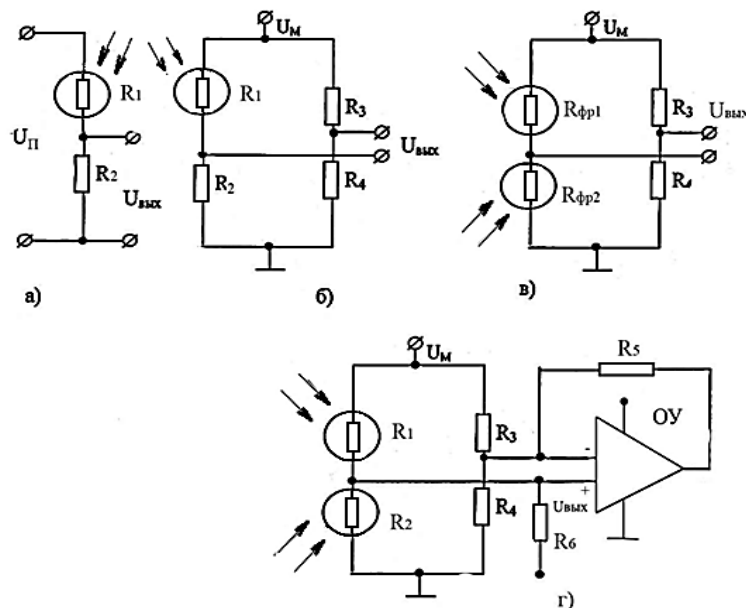


Рис.3. Измерительные схемы ОДПВ: а - делительная; б, в, г – мостовые.

Проанализируем делительную измерительную схему показанную на рис.4, которая аналогична схеме на рис.3, а и может быть рассмотрена как цепочка, состоящая из последовательно соединенных сопротивлений R_2 и $R_{\phi p1}$, на которую подается как на всю мостовую схему напряжение питания U_M . В этом случае напряжение $U_{вых}$ на сопротивлении $R_{\phi p1}$ можно найти из выражения:

$$U_{вых} = U_M - I_{\phi} * R_{\phi p1} = R_3 * I_{\phi}, \quad (10)$$

где: U_M - напряжение, приложенное к делителю, I_{ϕ} - ток в цепи делителя.

Так как величина фототока I_{ϕ} есть функция светового потока $\Phi_0(x)$, падающего на приемник излучения и при малых значениях светового потока эта зависимость линейная, то можно записать

$$I_{\phi} = S_{\phi p1} * \Phi_0(x), \quad (11)$$

где: $S_{\phi p1}$ - интегральная чувствительность $R_{\phi p1}$.

Так как величина темнового тока приемника излучения I_T мала по сравнению с I_{ϕ} , то можно записать:

$$I_T = I_{\phi} \quad (12)$$

с учетом последнего можно записать:

$$\frac{U_M - I_{\phi} R_3}{I_{\phi}} = R_{\phi p1} \quad (13)$$

или

$$\frac{U_M}{I_{\phi}} - R_3 = R_{\phi p1} \quad (14)$$

Подставив значения I_{ϕ} при $x=X_{мин}$ находим следующее

$$\frac{U_M}{\Phi_0(X_{мин})} - R_3 = R_{\phi p1}(X_{мин}) \quad (15)$$

при $x=X$,

$$\frac{U_M}{\Phi_0(X)} - R_3 = R_{\phi p1}(X) \quad (16)$$

Отсюда можно записать выражение для $\Delta R_{\phi p1}$:

$$\Delta R_{\text{фр1}} = R_{\text{фр1}}(X_{\text{мин}}) - R_{\text{фр1}}(X) = \frac{U_m}{S_{\text{фр1}}} * \left[\frac{1}{\Phi_0(X_{\text{мин}})} - \frac{1}{\Phi_0(X)} \right], \quad (17)$$

и

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \Delta R_{\text{фр1}} - R_{\text{фр1}}(X_{\text{мин}}) \\ &= \frac{1 - \Phi_0(X_{\text{мин}})}{\Phi_0(X)} \\ &\quad * \frac{1}{\left\{ 1 - S_1 * \Phi_0(X_{\text{мин}}) * \frac{R_3}{U_M} \right\}} \end{aligned} \quad (18)$$

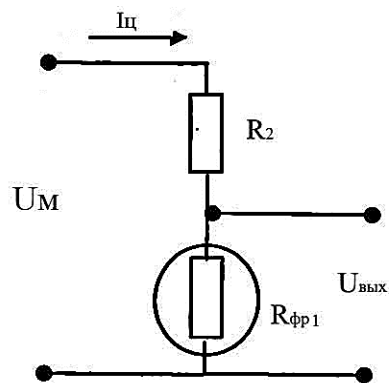


Рис.4. Делительная измерительная схема ОДПВ.

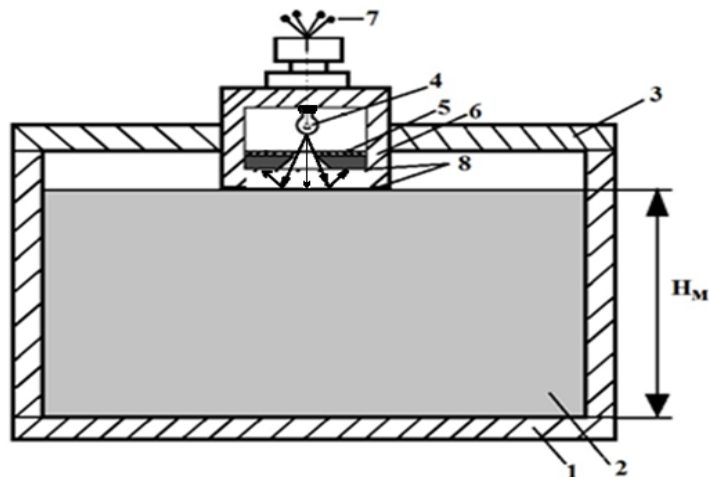


Рис.5. ОДПВ на основе полого световода для дискретного контроля максимального уровня жидкости. 1 – резервуар; 2 – жидкость; 3 – крышка резервуара; 4 – источник излучения; 5 – приемник излучения; 6 – полый световод; 7 – выводные провода; 8 – защитное стекло.

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K}{(K+1)^2} \cdot \frac{\Delta R_{\text{фр}}}{R_{\text{фр}}} \quad (19)$$

K – Коэффициент симметрии моста.

Рассмотрим статическую характеристику ОДПВ с СИИ и полым световодом при продольном перемещении ВМТ, физическая модель которого представлена на рис.5 при его использовании для контроля дискретного уровня жидкости в резервуаре [5, 10, 15, 16].

Исследования и расчет по формулам $\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{нр1}} + \Phi_{\text{отр2}}$ и $S(x) = S_{\text{сектора}} - S_{\Delta}$ показали, что график изменения статической характеристики $\Phi_0 = f(H)$ имеет вид показанный на рис.6, а.

Участок А (рис.6, а) статической характеристики составлял $4 \cdot 10^{-3}$ м, а участок В составлял $6 \cdot 10^{-3}$ м. Чувствительность преобразователя на основе ОДПВ определяется из выражения (20) [17, 18].

$$K = \frac{\pi D_0^2}{2x_0} \left(1 + \frac{x}{x_0} \right), \quad (20)$$

Анализ формулы (20) показывает, что для повышения чувствительности ОДПВ на основе полого световода необходимо увеличить D_0 и уменьшить x_0 .

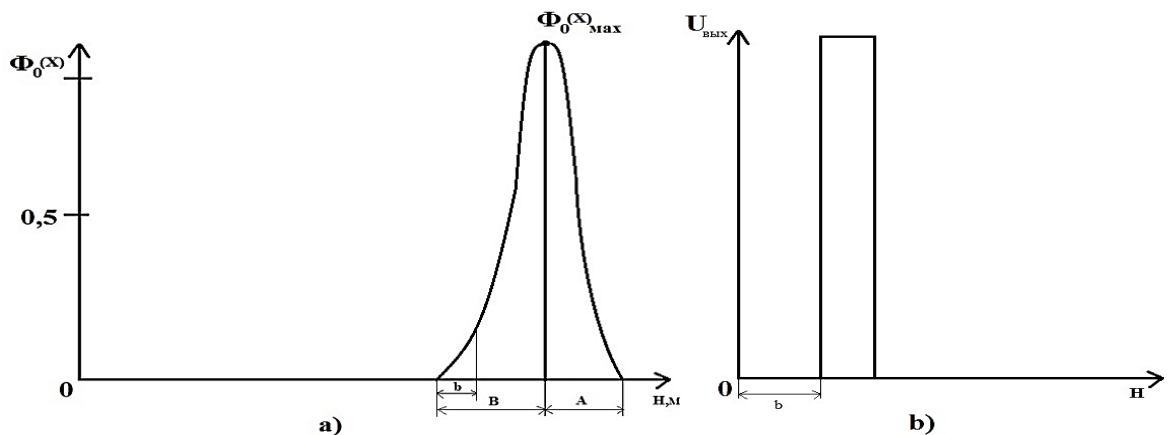


Рис.6. Статическая характеристика ОДПВ (а) и её дискретный вид (б) для контроля максимального уровня жидкости.

Вывод. Статические характеристики оптоэлектронных дискретных преобразователей определяются на основе совместного рассмотрения, конструкций преобразователей с полыми и волоконными световодами и соответствующей измерительной схемой с приемником излучения. Показано, что в оптоэлектронных

дискретных преобразователях перемещений преимущественно используются делительные и мостовые измерительные схемы. Получены статические характеристики релейных оптоэлектронных дискретных преобразователей с сосредоточенными источниками излучения на основе полых и волоконных световодов при продольных и поперечных перемещениях внешнего модулирующего тела.

Список использованных источников

1. Kholmatov U. et al. Static and dynamic characteristics of optoelectronic discrete converters for automatic measurement of displacements and dimensions //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2025. – Т. 321. – С. 03001.
2. Kholmatov U. S. et al. Characteristics of optoelectronic discrete displacement converters with hollow and fiber light guides //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – Т. 471. – С. 06015.
3. Шипулин Ю. Г. и др. Оптоэлектронный преобразователь для автоматических измерений перемещений и размеров //Мир измерений. – 2013. – №. 1. – С. 41-43.
4. Алматаев О. Т. и др. Оптоэлектронные преобразователи рефлексивного типа для автоматизации жидкостных и газовых поверочных расходомерных установок //Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – 2014. – №. 8. – С. 27-34.
5. Хамдамов Б. М. и др. Интеллектуальный оптоэлектронный прибор для контроля расхода воды в открытых каналах //Наука. Образование. Техника. – 2015. – №. 2. – С. 72-82.
6. Жумаев О. А. и др. Задачи разработки и проектирования оптоэлектронных преобразователей для газомерных установок //Вестник Курганского государственного университета. – 2015. – №. 3 (37). – С. 113-116.
7. Азимов Р. К. и др. Морфологический метод структурного проектирования оптоэлектронных преобразователей на основе полых и волоконных световодов (ОЭГТВС) //Современные материалы, техника и технологии в машиностроении». III Международная научно-практическая конференция. – 2016. – С. 15-19.

8. Kholmatov U. The Possibility of Applying the Theory of Adaptive Identification to Automate Multi-Connected Objects //The American Journal of Engineering and Technology. – 2022. – Т. 4. – №. 03. – С. 31-38.
9. Холматов У. С. Исследования математической модели волоконно-оптического датчика при продольном и поперечном перемещениях // Научно-технический журнал «Машиностроение». – 2022. – №. 1. – С. 78-85.
10. Kholmatov U. Optimization of Mathematical Model of Optoelectronic Discrete Displacement Converter // Scientific and Technical Journal Machine Building. – 2022. – №. 2. – С. 74-82.
11. Kholmatov U. Determination of the Main Characteristics of Optoelectronic Discrete Displacement Transducers with Hollow and Fiber Fiber //Scientific And Technical Journal Machine Building. – 2022. – №. 4. – С. 160-168.
12. Холматов У. С. Определение основных и статические характеристики оптоэлектронных дискретных преобразователей перемещений с полыми и волоконными светов // Научно-технический журнал «Машиностроение». – 2022. – №. 5. – С. 711-719.
13. Холматов У. С. Определение основных теории адаптивной идентификации для автоматизации многосвязных объектов //Namangan muhandislik texnologiya instituti Ilmiy-Texnika Jurnal. – 2022. – №. 1/7. – С. 544-550.
14. Kholmatov U. Intelligent discrete systems for monitoring and control of the parameters of technological processes on the basis of fiber and hollow fiber //Monograph.– 2022.–С. – 2022. – С. 5-114
15. Шипулин Ю. Г., Холматов У. С. Интеллектуальные дискретные системы для контроля и управления параметрами технологических процессов на основе волоконных и полых световодов //Монография, Андижан.–2018.–С. – 2018. – С. 1-140.
16. Холматов У. С. Статические характеристики оптоэлектронных дискретных преобразователей для автоматического измерения перемещений и размеров // Научно-технический журнал «Машиностроение». – 2023. – №. 2. – С. 190-201.

17. Холматов У. Статические характеристики оптоэлектронных дискретных преобразователей перемещений с полыми и волоконными световодами //Научно-технический журнал «Машиностроение». – 2024. – Т. 1. – №. 1. – С. 128-135.
 18. Холматов У. С. Расширение теории адаптивной идентификации применительно к многосвязным объектам // Научно-технический журнал «Машиностроение». – 2023. – №. 1. – С. 376-382.
 19. Холматов У. С. Характеристики основных теории адаптивной идентификации для автоматизации многосвязных объектов //International Journal of Education, Social Science & Humanities. – 2024. – Т. 12. – №. 4. – С. 1360-1369.
 20. Холматов У. С. Основы характеристики теории адаптивной идентификации для автоматизации многосвязных объектов //International Journal of Education, Social Science & Humanities. – 2024. – Т. 12. – №. 5. – С. 1515-1523.
 21. Zhumaev O. A. et al. Problems of Optoelectronic Transducers for Gas-Measuring Installations Design and Development //Вестник. – С. 113.
-

Kholmatov Umid Sadirdinovich Associate Professor of the Department of Transport Logistics, Andijan State Technical Institute, Andijan, Republic of Uzbekistan, Email: umid.xolmatov.76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2295-502X>

CHARACTERISTICS OF OPTOELECTRONIC DISCRETE DISPLACEMENT CONVERTERS WITH HOLLOW AND FIBER OPTICAL GUIDES

Abstract. This article discusses the issues of optoelectronic discrete converters (ODC) of any type - longitudinal or transverse displacement of the external modulating body (EMB). In connection with the development of such important sectors of the economy as mechanical engineering, metallurgy, oil and gas, chemical, industrial, construction, food industries and others, it is relevant to equip them with modern discrete displacement converters that allow monitoring and controlling such important quantities as liquid level, speed and flow rate of gases and liquids, as well as automate the processes of automatic accounting of individual items, products, goods, blanks and semi-finished products, which allows objectively analyzing the economic activity of enterprises and planning their further development.

Key words: radiation source, radiation receiver, measuring circuit, optical fiber, optical fibers, operational amplifiers.