

rastitelnogo syrya / A.V. Zykov, V.A. Yunin, A.M. Zakharov, A.N. Pereporskoy // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. – 2020. – No. 11 (101). – DOI:10.23670/IRJ020.101.11.022.

2. Mikhaylova A. V., Karpova V. P. Sushka lekarstvennogo rastitelnogo syrya i sokhraneniye biologicheskii aktivnykh veshchestv / A. V. Mikhaylova, V. P. Karpova // Fitoterapiya. – 2019. – No. 3. – S. 12-20.

3. Radchenko M. V., Radchenko T. B., Shevchenko V. V., Lyapin O. A. Novye elektrotekhnologii pererabotki rastitelnogo syrya Altayskogo kraya / M.V. Radchenko, T. B. Radchenko, V. V. Shevchenko, O. A. Lyapin // Polzunovskiy almanakh. – 2004. – No. 3. – S. 81–84.

4. Kostenko V. I., Martynov S. A., Petrova L. N. Elektrotekhnologicheskie metody pererabotki le-

karstvennogo rastitelnogo syrya / V. I. Kostenko, S. A. Martynov L. N. Petrova // Khimiya rastitelnogo syrya. – 2021. – No. 4. – S. 45–54.

5. Zhdanov D. A., Braslavskiy V.B., Kurkin V. A. Opredeleniye vlazhnosti lekarstvennogo rastitelnogo syrya metodom IK-termogravimetrii / D.A. Zhdanov, V.B. Braslavskiy, V.A. Kurkin // Aspirantskiy vestnik Povolzhya. – 2021. – No. 5–6. – S. 73–77.

6. Kuznetsova M. A. Lekarstvennoe rastitelnoe syre. Uchebnoe posobie dlya khimiko-tekhnologicheskikh tekhnikumov, farmakologicheskikh i meditsinskikh uchilishch. – Moskva: Vysshaya shkola, 1984. – 208 s.

7. Kudra, T., Mujumdar, A.S. (2009). Advanced Drying Technologies (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>.



УДК 681.586.48

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-264-10-84-91

В.А. Осипов, Ц.И. Калинин, Р.А. Куницын

V.A. Osipov, Ts.I. Kalinin, R.A. Kunitsyn

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛИНЕАРИЗАЦИИ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

LINEARIZATION OUTCOMES OF STATIC CHARACTERISTIC OF AN ULTRASONIC TRANSDUCER MEASURING THE PARAMETERS OF FIBER MATERIALS

Ключевые слова: ультразвук, математическая модель, погрешность измерения, линеаризация статической характеристики, измерительный преобразователь.

Известно, что качество получаемых полуфабрикатов и изделий из волоконного сырья зависит от физико-механических свойств используемых материалов. В настоящее время волоконное сырье обрабатывается на высокоскоростных агрегатах по технологиям непрерывных процессов с минимальным числом переходов. Такие технологии возможны при автоматическом регулировании работы агрегатов и автоматизированном экспресс-контроле, чтобы обеспечить показатели продуктов переработки (ленты, нити) с заданной массой (номером) и минимально допустимой неравномерностью (квадратическая неравномерность). Рассматривается перспектива решения этих задач путем применения ультразвуковых акустических датчиков. Цель работы – выполнить сравнительный анализ линеаризации статической характеристики ЭАПП и произвести выбор базовой схемы, обеспечивающей минимальную статическую по-

грешность. Выполнена аппроксимация входной статической характеристики ультразвукового датчика экспоненциальным полиномом, на основании чего обосновано ее преимущество в сравнении с логарифмическим методом линеаризации. Рассмотрены и исследованы 2 структурные схемы линеаризации статической характеристики ультразвукового датчика: коррекция с помощью логарифмического усилителя, коррекция с помощью функционального генератора. Без линеаризации коэффициент усиления изменяется от 6,1 до 0,4 В/кТекс, а относительная погрешность достигает 110%. Логарифмическая схема не обеспечивает линейности: отклонения K_u составляют от -36% до +61% относительно среднего значения 3,1 В/кТекс. Предложенная схема с функциональным генератором стабилизирует коэффициент усиления на уровне 3 В/кТекс с отклонениями, не превышающими погрешности измерительного тракта. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации систем автоматизированного контроля качества волокнистого сырья на предприятиях агропромышленного комплекса.

Keywords: *ultrasound, mathematical model, measurement error, linearization of static characteristics, measuring transducer.*

It is known that the quality of semi-finished products and products made from fiber raw materials depends on the physical and mechanical properties of the materials used. Currently, fiber raw materials are processed on high-speed units using continuous process technologies with a minimum number of transitions. Such technologies are possible with automatic control of unit operation and automated express control in order to ensure the performance of processed products (tapes, threads) with a given weight (number) and the minimum allowable unevenness (quadratic unevenness). The prospect of solving these problems through the use of ultrasonic acoustic sensors is discussed. The research goal is to make a comparative analysis of the linearization of the static characteristic of the electroacoustic piezoelectric transducer and select the basic scheme that provides

the minimum static error. We approximate the input static characteristic of an ultrasonic sensor by an exponential polynomial, on which basis its advantage in comparison with the logarithmic linearization method is justified. Two structural schemes of linearization of the static characteristic of an ultrasonic sensor are studied: correction using a logarithmic amplifier, and correction using a functional generator. Without linearization, the coefficient of amplification varies from 6.1 to 0.4 V kTex, and the relative error reaches 110%. The logarithmic scheme does not provide linearity: coefficient of amplification deviations range from -36% to +61% relative to the average value of 3.1 V kTex. The proposed scheme with a functional generator stabilizes the coefficient of amplification at the level of 3 V kTex with deviations not exceeding the error of the measuring path. The results obtained may be used in the modernization of automated quality control systems for fiber raw materials at enterprises of the agro-industrial complex.

Осипов Владислав Андреевич, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: soagau@yandex.ru.

Калинин Цезарь Иванович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: kalinin_vezar@mail.ru.

Куницын Роман Александрович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: kynizin_roman@mail.ru.

Osipov Vladislav Andreevich, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: soagau@yandex.ru.

Kalinin Tsezar Ivanovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: kalinin_vezar@mail.ru.

Kunitsyn Roman Aleksandrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: kynizin_roman@mail.ru.

Введение

В настоящее время волокнистые материалы естественного происхождения, такие как хлопок, лен, пенька, шерсть, шелк и другие сохраняют лидирующие позиции в структуре сырьевого баланса как для производства текстильных полуфабрикатов, так и в смежных отраслях, что обусловлено их уникальными свойствами, такими как высокая гигроскопичность, воздухопроницаемость и экологичность. Вместе с тем натуральные волокна характеризуются значительными различиями в физико-механических и геометрических параметрах – разрывная нагрузка и линейная плотность. Так, разрывная нагрузка хлопкового волокна одной и той же партии может варьироваться в пределах 20-30%, а линейная плотность (тонина) – на 15-25%, что серьезным образом влияет на показатели качества готового волоконного сырья. С учетом влияния на физико-механические параметры исходного сырья особенностей выращивания сырья, таких

как состав почвы, климатические условия, сорт и т.д., необходимо проведение инструментального контроля – линейной плотности. Наиболее перспективным методом контроля линейной плотности является ультразвуковой метод контроля, требующий решения проблемы повышения точности измерительного преобразователя, в частности снижения статической погрешности [1, 2].

В настоящее время существует множество разнообразных по принципу действия и назначению измерительных преобразователей (далее – ИП) различных физических величин. Одним из основных классификационных признаков следует считать физическую природу входного и выходного сигналов [1].

Для ультразвукового измерительного преобразователя волокнистых материалов:

- сигнал синусоидального напряжения генератора 150 кГц преобразуется в сигналы напряжения постоянного тока в аналоговом и цифровом значении (U , N);

- входной сигнал линейной плотности волокон ленты G (гр/м, Текс) преобразуется в электрический сигнал вида U , N ;
- ультразвуковой ИП генерирует акустические волны по электрическим сигналам электрического генератора.

В основу принципа действия положено преобразование потока акустических ультразвуковых волн и, ИП рассматривается как электроакустический пьезопреобразователь (далее – ЭАПП). В зависимости от направления преобразования различают ЭАПП-излучатели и приемники.

В нашем случае действие ЭАПП основано на двойном пьезоэлектрическом эффекте – преобразовании электрической высокочастотной энергии в акустическую (упругие колебания среды) на основе пьезоэффектов в прямом и обратном направлении. Пьезоэлектрические электроакустические преобразователи удовлетворяют требованию неискаженной передачи сигнала и обратимы, т.е. могут работать и как излучатели, и как приемники, подчиняясь принципу взаимности [2-4].

Цель исследования является сравнительный анализ линеаризации статической характеристики ЭАПП и выбор базовой схемы, обеспечивающей минимальную статическую погрешность.

Задачи исследования:

- рассмотреть устройство измерения «ЭАПП» для контроля линейной плотности волоконных продуктов;
- разработать схемы линеаризации с логарифмическим и функционально-генераторным способами линеаризации статической характеристики для данного ЭАПП;

- провести исследование двух вышеизложенных схем линеаризации и построить выходные характеристики, оценить погрешности линеаризации и провести их анализ.

Теоретическое обоснование выбора метода линеаризации. При прохождении ультразвуковой волны через волокнистую среду происходит экспоненциальное затухание амплитуды сигнала в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера [4]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha G}, \quad (1)$$

где I – интенсивность прошедшего сигнала, В;

I_0 – интенсивность падающего сигнала, В;

α – коэффициент затухания, зависящий от типа волокна и частоты ультразвука;

G – линейная плотность (развес) ленты, текс.

Объекты и методы

Объектом данного исследования является процесс измерения линейной плотности волокнистых материалов растительного и животного происхождения с использованием ультразвукового электроакустического пьезопреобразователя (ЭАПП).

Измерения производились на пробах волокнистой ленты типовой сортировки из хлопковых волокон средневолокнистого хлопка вырабатываемых чесальными машинами на АО БМК "Меланжист Алтай".

Пробы формировались в диапазоне 0-6 текса в виде контрольных паковок через 1 текс на акустической нагрузке ЭАПП, представленной на рисунке 1 б по плану измерений развеса волоконных продуктов [2, 5].

Общий вид ультразвукового преобразователя, акустической нагрузки и вторичного прибора приведены на рисунке 1 а, б, в.

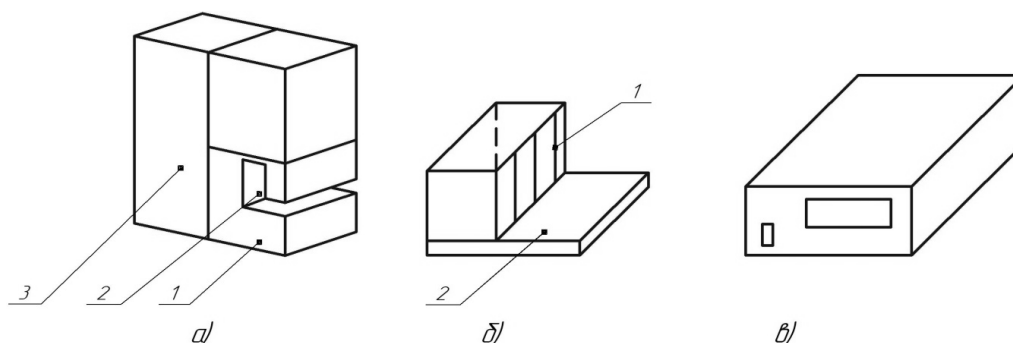


Рис.1. Общий вид датчика, акустической нагрузки и вторичного прибора:
а – ультразвукового датчик; б – акустическая нагрузка; в – вторичный прибор

В корпусе датчика 1 выполнен измерительный канал 2, в котором установлены пьезопреобразователи излучателя и приемника для формирования электроакустического измерительного сигнала. Пьезопреобразователи излучателя подключены к электронным схемам генератора электрического сигнала. Преобразователи приемников подключены к схемам усиления и детектирования для формирования сигнала напряжения постоянного тока. Первичный преобразователь подключается к вторичному прибору для формирования аналогового и цифрового сигналов в блоке измерения и индикации (рис. 1 в).

Акустическая нагрузка (рис. 1 б) выполнена в виде сетчатого прямоугольного корпуса, закрепленного на установочной пластине 2. Используемый волокнистый материал устанавливается в канал датчика для испытания его характеристик.

При контроле волоконных ленточных продуктов лента пропускается через канал датчика с постоянной скоростью и формируется аналоговый и цифровой сигналы линейной плотности испытуемой ленты на определенных отрезках продукта для последующего анализа показателей качества ленты [2, 5].

Фото анализатора плотности волокнистой ленты представлено на рисунке 2.



Рис. 2. Внешний вид установки для анализа плотности волокнистой ленты

На переднем плане прибора находится ультразвуковой измерительный преобразователь 1 через преобразовательный блок 2, при помощи роликов 3 осуществляется протяжка с постоянной скоростью (12 м 1 мин.) волокнистой ленты 4. Полученные данные в виде функции $I_0 = f(G)$ поступают на вторичный прибор и цифровое табло 6 (рис. 2).

В приборе информация с первого преобразователя проходит линеаризацию, и формируются аналоговые и цифровые показатели ее линейной плотности на трехсантиметровом отрезке ленты. Аналоговая информация используется для контроля при помощи милливольтметра 5, а цифровая передается на внешний программно-аппаратный комплекс анализа показателей неровности ленты (ЭВМ).

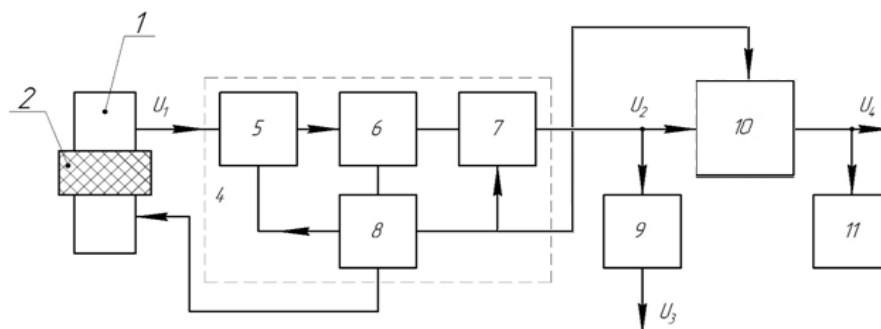
Настройка устройства в статике осуществляется по акустической нагрузке (рис. 1 б) при помощи милливольтметра 5 и цифрового табло 6.

Блок-схемы электрических схем преобразователей для линеаризации статической характеристики датчика приведены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 приведена блок-схема логарифмического линеаризатора [6-11].

Схема линеаризатора включает электроакустический преобразователь 1 с волоконной лентой 2 определенной плотности, формирующий рабочий сигнал напряжения U_1 с частотой 150 КГц, который поступает в измерительный блок 4 и преобразуется путем усиления в предварительном усилителе 5, логарифмическом усилителе 6, детектируясь в сигнал U_2 постоянного тока, который поступает на блок вольтметра 8 и на выход аналогового сигнала U_3 . Также сигнал U_2 поступает на блок 10 АЦП с выходом на цифровое табло 11 и на выход цифрового сигнала U_4 . Электропитание ЭАПП и вторичного прибора осуществляется от блока электропитания 8 в измерительном блоке устройства.

Блок-схема способа линеаризации статической характеристики с помощью функционального генератора приведена на рисунке 4.

Схема линеаризации включает электроакустический пьезопреобразователь 1 с волоконной лентой определенной величины развеса (номера) в акустической нагрузке, который формирует рабочий сигнал напряжения U_1 с частотой 150 КГц, сигнал U_1 поступает в измерительный блок (далее – ИБ). Далее сигнал усиливается, детектируется в блоках 3, 4 в сигнал U_3 постоянного тока с дальнейшим усилением в блоке 5 и поступает на вход блока компаратора 10. Второй сигнал компаратора формируется генератором высокой частоты f_0 с преобразованием в меньшую частоту $U_{f0/n}$ и поступает на запуск функционального генератора для задания функции экспоненциального полинома определенного вида. Сигнал U_4 поступает на второй вход компаратора 10 и на выход цифрового сигнала через блок



The diagram illustrates a control system for a two-link manipulator. It consists of several interconnected blocks and feedback loops. The system is divided into two main sections: a top section (blocks 3, 4, 5, 6) and a bottom section (blocks 7, 8, 9, 10, 11, 12). Block 13 is a feedback block. The output of the system is U_{bix} and n_{bix} .

G (кТекс)	0	1	2	3	4	5	6
$U_{\text{сод}}(B)$	>15	15	8,9	4,8	2,1	0,9	0,5
$U_{\text{свн}}(B)$	>15	15	14,2	13,3	10,2	5,9	0,5
$U_{\text{свн } 1}(B)$	>15	15	12,1	9,2	6,4	3,5	0,5
$U_{\text{свн } 2}(B)$	>15	14,9	12,5	10,1	5	2,6	0,5

Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 10 (264), 2026

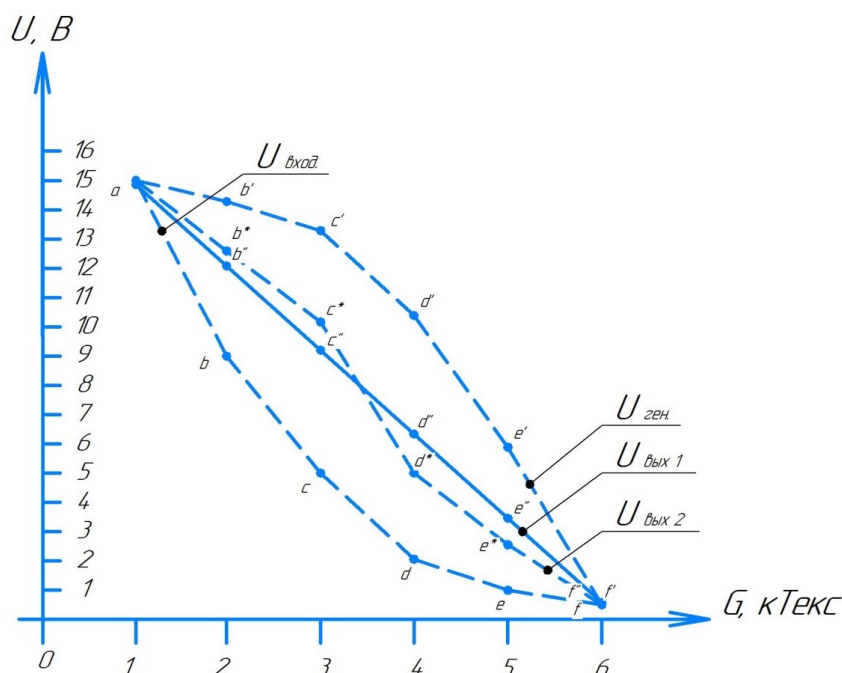


Рис. 5. Графики линейризации ультразвукового измерительного преобразователя

По точкам перегиба графиков выходного сигнала предварительного усилителя (a, b, c, d, e, f) можно вычислить коэффициенты выходного усилителя $K_{и}$ при помощи следующего выражения:

$$K_{и} = \frac{\Delta U}{\Delta G}, \quad (3)$$

где ΔU – изменение выходного сигнала на приращение массы волокна;

ΔG – изменение массы волокна 1 кгТекс.

Проведя анализ участков графика выходного сигнала без линейризации ($U_{вых0}$) по выражению (3), коэффициенты выходного усилителя ($K_{и}$) будут иметь следующие значения:

$$K_{и ab} = \frac{15 - 8,9}{1} = 6,1 \text{ В/кгТекс};$$

$$K_{и bc} = \frac{8,9 - 4,8}{1} = 4,1 \text{ В/кгТекс};$$

$$K_{и cd} = \frac{4,8 - 2,1}{1} = 2,7 \text{ В/кгТекс};$$

$$K_{и de} = \frac{2,1 - 0,9}{1} = 1,2 \text{ В/кгТекс};$$

$$K_{и ef} = \frac{0,9 - 0,5}{1} = 0,4 \text{ В/кгТекс}.$$

Для расчета погрешности выходного сигнала без линейризации найдем среднее значение коэффициента усиления:

$$K_{ср} = \frac{6,1 + 4,1 + 2,7 + 1,2 + 0,4}{5} = 2,9 \text{ В/кгТекс}.$$

Произведя расчет статической погрешности на каждом из участков, получим следующие значения (табл. 2).

Таблица 3

Величина погрешности выходного сигнала участков характеристики

Участок характеристики	$\Delta K_{и ab}$	$\Delta K_{и bc}$	$\Delta K_{и cd}$	$\Delta K_{и de}$	$\Delta K_{и ef}$
Значение отклонения, В/кгТ	3,2	1,2	-0,2	-1,7	-2,5
Процент отклонения, %	+110	+41	-7	-59	-86

Согласно расчетам погрешности измерения составляют величины до 110%, что делает практически невозможным измерение выходного сигнала с определенной точностью.

Аналогичным способом формируется выходная характеристика функционального генератора:

$$K_{и bc} = \frac{8,9 - 4,8}{1} = 4,1 \text{ В/кгТекс};$$

$$K_{и cd} = \frac{4,8 - 2,1}{1} = 2,7 \text{ В/кгТекс};$$

$$K_{и de} = \frac{2,1 - 0,9}{1} = 1,2 \text{ В/кгТекс};$$

$$K_{и ef} = \frac{0,9 - 0,5}{1} = 0,4 \text{ В/кгТекс}.$$

Компенсации выходной характеристики при помощи функционального генератора в виде статической характеристики (U_n) формирует выходной сигнал в виде коэффициента выходного усилителя (K_u) одной величины:

$$K_{uab} = K_{ubc} = K_{ucd} = K_{ude} = K_{uef} = 3 \text{ В/кТ}.$$

Параметры выходного сигнала, созданные при помощи функционального генератора, будут являться прямой линией, что снижает к минимуму значение статической погрешности.

Линеаризация характеристики логарифмическим методом заключается в том, что кривая аппроксимируется логарифмической функцией, формирует характеристику $U_{вых2}$ и погрешность от среднего значения $K_u = 3,1 \text{ В/кТ}$ (табл. 3).

Таким образом, линеаризация логарифмическим методом не позволяет избавиться от статической погрешности во всем диапазоне измерений 1-6 кТекс.

Таблица 4

Величина погрешности выходного сигнала участков характеристики

Участок характеристики	ΔK_{uab}	ΔK_{ubc}	ΔK_{ucd}	ΔK_{ude}	ΔK_{uef}
Значение отклонения, В/кТ	-0,6	-0,6	+1,9	-1,1	-1,1
Процент отклонения, %	-19	-19	+61	-36	-36

Выводы

При проведении исследования линеаризации статической характеристики ультразвукового измерительного преобразователя получены следующие результаты:

- статическая характеристика ультразвукового измерительного преобразователя имеет сложный нелинейный характер;

- получение выходного сигнала по среднему коэффициенту выходного усилителя без линеаризации формирует значительную статическую погрешность, что практически не позволяет проводить измерения в заданном диапазоне 1-6 кТекс;

- линеаризация логарифмическим методом по предложенной схеме (без дополнительной компенсации) не позволяет добиться одинаковой величины коэффициенту выходного усилителя во всем диапазоне измерений, а значение коэффициента по среднему значению приводит к значительной статической погрешности при чувствительности 2,3 В/кТекс с погрешностью от +110% до -86%;

- линеаризация с функциональным генератором по предложенной электрической схеме (формирование зеркальной экспоненциальной функции от первичного преобразователя) позволяет установить коэффициент выходного усилителя во всем диапазоне измерений и полу-

чить линейную статическую характеристику устройства с чувствительностью 3 В/кТекс, статическая погрешность стремится к нулю;

- предложенная электрическая схема формирования выходного сигнала ультразвукового измерительного преобразователя (линеаризация статической характеристики с функциональным генератором) позволяет исключить статическую погрешность и в целом значительно повысить точность измерений как одного из элементов базовой схемы устройства.

Библиографический список

1. Полищук, Е. С. Измерительные преобразователи: учебник для вузов / Е. С. Полищук. – Киев: Вища школа, 1981. – 296 с. – Текст: непосредственный.
2. Калинин, Ц. И. Обоснование применения высокоточного ультразвукового устройства автоматизированного контроля параметров волокнистых продуктов для возможности использования на предприятиях переработки волоконного сырья российского сельскохозяйственного производства / Ц. И. Калинин, В. А. Осипов, Р. А. Куницын. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-237-7-70-77. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 7 (237). – С. 70-77.

3. Ультразвук: маленькая энциклопедия / гл. ред. И. П. Голямина. – Москва: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с. – Текст: непосредственный.

4. Wang Zh., Zhou H., Ren L., et al. (2023). Lambert-Beer Law and Its Derivation in College Textbooks of Analytical Chemistry. *Chinese Journal of Chemical Education*. 44 (24): 116-122. DOI: 10.13884/j.1003-3807hxjy.2023070206.

5. Справочник по хлопкопрядению / под ред. докт. техн. наук Н. М. Белицина; Центр. науч.-исслед. ин-т хлопчатобумажной пром-сти. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Гизлегпром, 1955. – 728 с. – Текст: непосредственный.

6. Алдошина, И. А. Электроакустические преобразователи. Громкоговорители, стереотелефоны, микрофоны: учебник для вузов / И. А. Алдошина. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 336 с. – Текст: непосредственный.

7. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шаропова. – Москва: Техносфера, 2006. – 632 с. – Текст: непосредственный.

8. Осадченко, В. Х. Операционные усилители: учебное пособие / В. Х. Осадченко, Я. Ю. Волкова. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2020. – 156 с. – Текст: непосредственный.

9. Ленк, Дж. Руководство для пользователей операционных усилителей / Дж. Ленк; пер. с англ.; под ред. И.Н. Теплюк. – Москва: Связь, 1978. – 328 с. – Текст: непосредственный.

10. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва: Наука, 1979. – 288 с. – Текст: непосредственный.

11. Никифоров, И. К. Электронная аппаратура. Операционные усилители, их разновидности и применение: учебное пособие / И. К. Никифоров. – Москва: Инфра-Инженерия, 2024. – 428 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Polishchuk E. S. Izmeritelnye preobrazovateli: uchebnyk dlya vuzov / E. S. Polishchuk. – Kiev: Vishcha shkola, 1981. – 296 s.

2. Kalinin, Ts. I. Obosnovanie primeneniya vysokotochnogo ultrazvukovogo ustroystva avtomatizirovannogo kontrolya parametrov voloknistykh produktov dlya vozmozhnosti ispolzovaniya na predpriyatiyakh pererabotki volokonnoy syrya rossiyskogo selskokhozyaystvennogo proizvodstva / Ts. I. Kalinin, R. A. Kunitsyn, V. A. Osipov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2024. – No. 7 (237). – S. 70-77. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-237-7-70-77.

3. Ultrazvuk: malenkaya entsiklopediya / gl. red. I.P. Golyamina. – Moskva: Sovetskaya entsiklopediya, 1979. – 400 s.

4. Wang Zh., Zhou H., Ren L., et al. (2023). Lambert-Beer Law and Its Derivation in College Textbooks of Analytical Chemistry. *Chinese Journal of Chemical Education*. 44 (24): 116-122. DOI: 10.13884/j.1003-3807hxjy.2023070206.

5. Spravochnik po khlopkopryadeniyu / pod red. d-ra tekhn. nauk N. M. Belitsina; Tsentr. nauch.-issled. in-t khlopchatobumazhnoy prom-sti. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Gizlegprom, 1955. – 728 s.

6. Aldoshina I. A. Elektroakusticheskie preobrazovateli. Gromkogovoriteli, stereotelefony, mikrofony: uchebnyk dlya vuzov / I. A. Aldoshina. – 2-e izd., ster. – Sankt-Peterburg: Lan, 2025. – 336 s.

7. Sharapov V. M. Pezoelektricheskie datchiki / V.M. Sharapov, M.P. Musienko, E.V. Sharapova. – Moskva: Tekhnosfera, 2006. – 632 s.

8. Osadchenko V. Kh. Operatsionnye usiliteli: uchebnoe posobie / V. Kh. Osadchenko, Ya. Yu. Volkova. – Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2020. – 156 s.

9. Lenk Dzh. Rukovodstvo dlya polzovateley operatsionnykh usiliteley / Dzh. Lenk; per. s angl. pod red. I.N. Teplyuk. – Moskva: Svyaz, 1978. – 328 s.

10. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach. – Moskva: Nauka, 1979. – 288 s.

11. Nikiforov I. K. Elektronnaya apparatura. Operatsionnye usiliteli, ikh raznovidnosti i primeneniye: uchebnoe posobie / I. K. Nikiforov. – Moskva: Infra-Inzheneriya, 2024. – 428 s.

