

Компенсационный микроэлектромеханический преобразователь ускорения с пьезоэлектрическим чувствительным элементом и оптическим считыванием

В. И. Бусурин, К. А. Коробков , Зо Лвин Хту

Московский авиационный институт, Москва, Россия

 kane_and_lynch@bk.ru

Аннотация

Введение. Современные мобильные объекты управления требуют применения высокочувствительных преобразователей параметров движения, например ускорения, с широким диапазоном измерений. Повысить чувствительность к измеряемым параметрам можно используя прецизионные оптические средства, например на основе туннельного эффекта. Однако рабочие диапазоны индуцированных перемещений составляют менее микрометра, что создает трудности позиционирования чувствительного элемента. Для повышения технологичности, расширения диапазона измерений и уменьшения погрешностей преобразователей ускорения с оптическим туннелированием можно использовать компенсационные схемы с активным чувствительным элементом – пьезоэлектрическим актуатором.

Цель работы. Расширение диапазона измерений микроэлектромеханического преобразователя ускорения с помощью комплексного подхода, включающего введение контура компенсации перемещений чувствительного элемента на основе обратного пьезоэлектрического эффекта и детектирование этих перемещений оптическими средствами.

Материалы и методы. Предложен способ компенсации перемещений чувствительного элемента, заключающийся в использовании биморфной пьезоэлектрической пластины в качестве инерционного элемента. Рассмотрено применение оптического считывания субмикрометровых перемещений чувствительного элемента.

Результаты. Разработаны структурная и функциональная схемы компенсационного микрооптоэлектромеханического преобразователя ускорения с биморфным пьезоэлектрическим чувствительным элементом. Исследованы деформации чувствительного элемента под действием ускорений (до 100 м/с^2) и компенсационных напряжений, амплитуда которых не превышает единиц вольт, для обеспечения возможности использования оптического туннельного эффекта в предлагаемом преобразователе.

Заключение. Разработана и исследована математическая модель преобразователя, достигнуто увеличение диапазона измерения в 2.5 раза. Показано, что введение компенсирующей обратной связи не сужает разрешенный частотный диапазон измеряемых ускорений.

Ключевые слова: микрооптоэлектромеханические системы, преобразователь ускорения, обратный пьезоэлектрический эффект, биморфный пьезоэлемент, чувствительный элемент, оптический туннельный эффект, компенсация

Для цитирования: Бусурин В. И., Коробков К. А., Зо Лвин Хту. Компенсационный микроэлектромеханический преобразователь ускорения с пьезоэлектрическим чувствительным элементом и оптическим считыванием // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 79–89. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-79-89

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00954, <https://rscf.ru/project/23-29-00954/>

Статья поступила в редакцию 26.10.2023; принята к публикации после рецензирования 11.12.2023; опубликована онлайн 29.02.2024



A Compensator Microelectromechanical Acceleration Transducer with a Piezoelectric Sensing Element and Optical Reading

Vladimir I. Busurin, Kirill A. Korobkov ✉, Zaw Lwin Htoo

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ kane_and_lynch@bk.ru

Abstract

Introduction. Modern mobile control objects require the use of highly sensitive transducers of motion parameters, e.g., acceleration, with a wide measurement range. Increased sensitivity to measured parameters can be achieved by using precision optics, e.g., based on the tunneling effect. However, operating ranges of induced movements are less than a micrometer, which creates difficulties in positioning the sensing element. In order to improve manufacturability, to extend the measurement range and to reduce errors of acceleration transducers with optical tunneling, compensation circuits with a piezoelectric actuator as an active sensor can be used.

Aim. To extend the measurement range of microelectromechanical acceleration transducers through the use of an integrated approach, including the introduction of a compensation circuit for sensor movements based on the inverse piezoelectric effect and detection of these movements by optical means.

Materials and methods. An approach to compensating sensor movements is proposed. This approach consists in using a bimorph piezoelectric plate as an inertial element. The use of optical reading of sensor sub-micrometer displacements is considered.

Results. A block scheme and a functional scheme of a compensator micro-opto-electromechanical acceleration transducer with a bimorph piezoelectric sensing element are developed. Deformations in the sensing element under the influence of accelerations (up to 100 m/s^2) and compensation voltages, whose amplitude does not exceed several volts, are investigated to ensure the possibility of using the optical tunneling effect in the proposed transducer.

Conclusion. A mathematical model of the transducer was developed and studied. A 2.5-fold increase in the measurement range was achieved. It was shown that the introduction of compensation feedback does not decrease the permissible frequency range of measured accelerations.

Keywords: micro-opto-electromechanical systems, acceleration transducer, inverse piezoelectric effect, bimorph piezoelectric element, sensing element, optical tunneling effect, compensation

For citation: Busurin V. I., Korobkov K. A., Zaw Lwin Htoo. A Compensator Microelectromechanical Acceleration Transducer with a Piezoelectric Sensing Element and Optical Reading. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 79–89. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-79-89

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-29-00954, <https://rscf.ru/project/23-29-00954/>

Submitted 26.10.2023; accepted 11.12.2023; published online 29.02.2024

Введение. Микроэлектромеханические (МЭМ) преобразователи ускорения являются одним из основных компонентов современных малогабаритных навигационных систем, включаемых в контур управления различных подвижных объектов [1, 2]. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими преобразователями, более высокой чувствительностью к ускорению, меньшими массогабаритными показателями, низким энергопотреблением и

т. д. [3, 4]. МЭМ-преобразователи ускорения могут быть эффективно использованы в навигационных системах как наземных объектов, так и летательных аппаратов, где минимизация массогабаритных характеристик и потребность в высокой устойчивости измерительных устройств параметров движения к воздействиям внешних явлений весьма важны [5, 6].

С целью минимизации влияния внешних явлений используются оптические средства в кон-

туре считывания положения чувствительного элемента (ЧЭ) МЭМ-преобразователя ускорения [7, 8]. Одним из прецизионных способов считывания является использование модулятора на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Микрооптоэлектромеханический (МОЭМ) преобразователь ускорения менее подвержен влиянию внешних электромагнитных полей и обладает большей устойчивостью к воздействию ортогональных ускорений за счет уменьшения рабочего хода ЧЭ по сравнению с преобразователями, использующими емкостное считывание [9, 10]. Однако при использовании оптического модулятора на основе ОТЭ недопустим механический контакт между его элементами, так как это приведет к повреждениям или нарушению корректности функционирования узла считывания [11, 12]. Избежать этого и расширить диапазон измеряемых ускорений позволяет использование в качестве ЧЭ биморфной пьезоэлектрической пластины, перемещения которой минимизируются подачей на нее компенсационного напряжения контура обратной связи (ОС).

Данный подход, включающий использование высокоточного оптического считывания и контура ОС, позволяет добиться повышения чувствительности к действующему линейному ускорению и расширения диапазона измерений компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения на основе ОТЭ.

Методы. Функциональная и структурная схемы компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения. Функциональная схема компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения на основе ОТЭ (рис. 1) включает: корпус; биморфный пьезоэлектрический чувствительный элемент БМ ПЭ ЧЭ; оптический модулятор ОМ, образованный призмой полного внутреннего отражения ПВО и призмой с поглощающим покрытием ПП; источник оптического излучения ИОИ и фотоприемник ФП, установленные на катетные грани призмы ПВО; электронный блок обработки ЭБО.

В качестве ЧЭ использована ПЭ-пластина БМ-структуры длиной L , шириной b и толщиной h , образованная двумя пьезокерамическими слоями на обеих сторонах токопроводящей подложки. ЧЭ имеет прямоугольное поперечное сечение и является балкой с жесткой заделкой: один конец жестко закреплен в корпусе, а второй – свободно перемещается. Измеряемое линейное ускорение a индуцирует распределенную инерционную силу, действующую на ЧЭ и приводящую к его деформации. Деформация ЧЭ v приводит к изменению зазора d в ОМ относительно начального зазора d_0 , что влияет на значение отражательной способности R в структуре "призма ПВО–зазор–призма с ПП" и приводит к модуляции амплитуды выходной оптической мощности. Несущим сигналом является входная мощность оптического

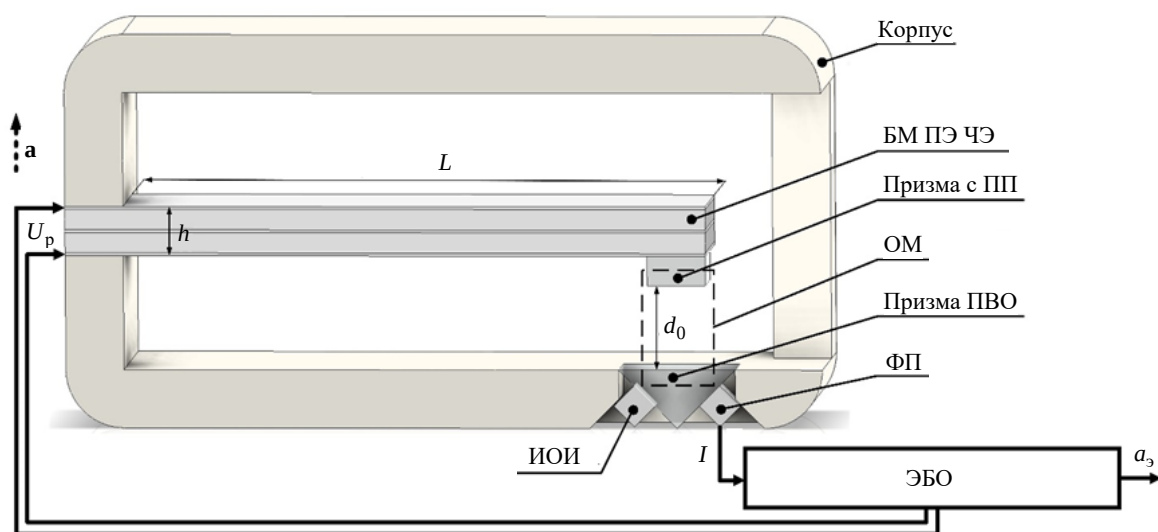


Рис. 1. Функциональная схема компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения

Fig. 1. Functional diagram of the compensator MOEM-acceleration transducer

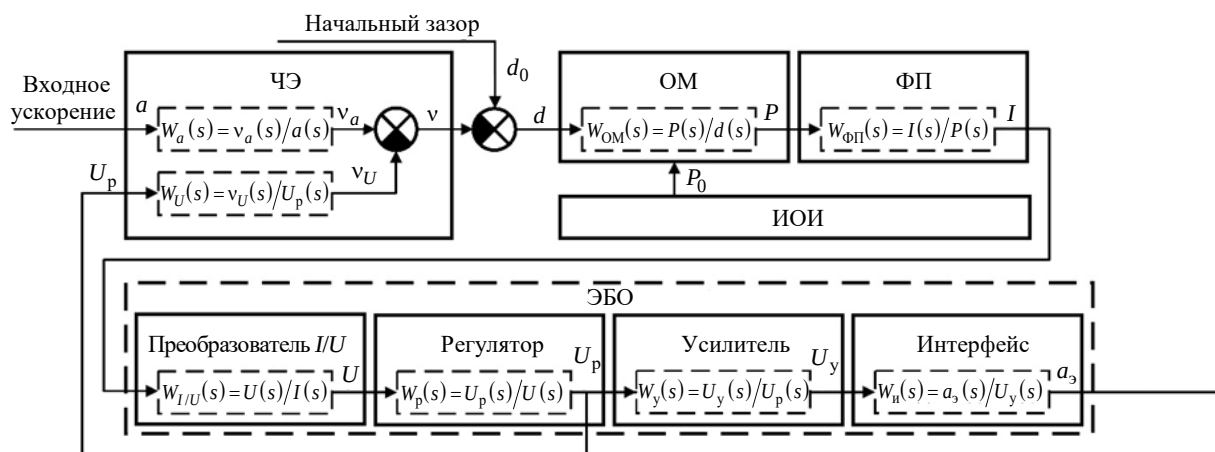


Рис. 2. Структурная схема компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения

Fig. 2. Structural diagram of the compensator MOEM-acceleration transducer

излучения P_0 , формируемого ИОИ. Модулированная выходная оптическая мощность P детектируется ФП, генерирующим пропорциональный ей электрический ток I , который поступает в ЭБО, вычисляющий эквивалент измеренного ускорения a_3 в удобном для обработки пользователем или надсистемой виде и формирующий напряжение U_p в контуре ОС для создания механического напряжения в ПЭ БМ ЧЭ с целью компенсации деформации ЧЭ под действием линейного ускорения a .

Структурная схема компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения с дополнительными элементами, образующими ЭБО, и передаточными функциями динамических звеньев, входящих в состав преобразователя, приведена на рис. 2.

ЭБО содержит преобразователь "ток–напряжение" (I/U), трансформирующий фототок I в напряжение U ; регулятор, реализующий закон управления для цепи ОС U_p ; усилитель, подготавливающий обработанный сигнал для вывода U_y ; интерфейс, формирующий сигнал, являющийся эквивалентом измеренного ускорения a_3 .

Математическая модель компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения. ЧЭ компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения является балкой с жесткой заделкой и выполнен из двух слоев пьезокерамического материала, между которыми и на которых расположены электроды. При приложении соот-

ветствующего электрического напряжения к слоям один из них начинает расширяться вдоль средней линии ЧЭ, а второй – сужаться, что приводит к изгибным деформациям ЧЭ, способным уменьшить его перемещения, вызванные распределенной инерционной силой, индуцированной измеряемым ускорением.

Перемещения свободного края БМ ПЭ ЧЭ v_a , вызванные его деформацией под действием линейного ускорения a , зависят от геометрических параметров – длины L и толщины h ЧЭ; после завершения переходных процессов перемещение v_a можно определить так [11]:

$$v_a(a) = -\left(\frac{12}{Ebh^3}\right)\left(\frac{\rho VL^3}{8}\right)a = -\frac{3}{2}\frac{\rho L^4}{Eh^2}a, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга основного материала ЧЭ (без учета подложки); b – ширина ЧЭ; h – толщина ЧЭ; ρ – плотность материала ЧЭ; V – объем ЧЭ; L – длина ЧЭ; a – измеряемое входное ускорение.

Получаемое перемещение v_a ЧЭ должно соответствовать рабочему диапазону зазоров модулятора на основе ОТЭ. Это обеспечивается выбором соответствующих длины L и толщины h (1) с учетом параметров материала ЧЭ, например пьезокерамики PZT-5H (модуль Юнга $E = 4.9 \cdot 10^{10}$ Н/м; плотность $\rho = 7.87 \cdot 10^3$ кг/м³).

Компенсация положения ЧЭ предполагает использование БМ-пьезопластины. Популярность использования пьезоматериалов в современных системах прецизионного позиционирования обусловлена высокой точностью пере-

мещений, быстротой реакции на входной сигнал, способностью предоставлять высокое значение силы и т. д. [13]. Изгибные перемещения БМ ЧЭ происходят за счет взаимно противоположного изменения длины ПЭ-слоев при приложении к ним соответствующих потенциалов. Дифференциальная схема включения позволяет добиться наибольшей эффективности при использовании БМ ЧЭ и достигать наибольших требуемых перемещений (сотни нанометров) без поднятия уровня максимального напряжения в контуре ОС (примерно десятки вольт) [14].

Изгибные перемещения БМ ПЭ ЧЭ v_U под действием электрического напряжения U_p определяются так [15]:

$$v_U(U_p) = 3 \frac{d_{31} L^2}{h^2} U_p, \quad (2)$$

где d_{31} – ПЭ-модуль материала ЧЭ; L – длина ЧЭ; h – толщина ЧЭ; U_p – входное напряжение БМ ПЭ ЧЭ, поступающее с регулятора.

Под действием измеряемого линейного ускорения a (направлено вверх в плоскости на рис. 1) ЧЭ испытывает деформации v_a в направлении, противоположном направлению вектора a (вниз), которые компенсируются смещением ЧЭ v_U , обусловленным обратным пьезоэффектом при подаче компенсационного напряжения регулятора U_p в направлении, совпадающем с a (вверх).

Для обеспечения высокой чувствительности МОЭМ-преобразователя к действующему ускорению при условии ограничения на значение максимального компенсационного напряжения с учетом (1) и (2) определены геометрические параметры ЧЭ: длина ЧЭ $L = 10$ мм; толщина ЧЭ $h = 0,75$ мм; ширина ЧЭ $b = 4$ мм. На рис. 3 представлен изгиб средней линии БМ ПЭ ЧЭ МОЭМ-преобразователя под действием линейного ускорения a (1 – фиолетовая линия); при подаче компенсационного электрического напряжения U_p (2 – красная линия); при одновременном воздействии a и U_p (3 – зеленая линия).

При использовании данных геометрических параметров ЧЭ максимальное отклонение от исходного положения v_a , находящееся вблизи свободного края ЧЭ, под действием ускорения

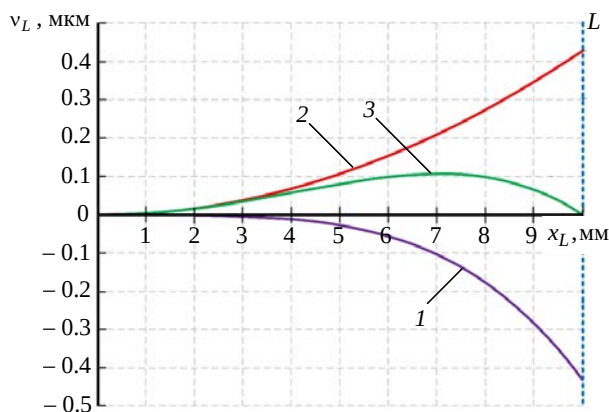


Рис. 3. Изгиб средней линии ЧЭ МОЭМ-преобразователя ускорения: 1 – под действием a ;

2 – при подаче U_p ; 3 – под действием a и U_p

Fig. 3. Bending of the middle line of the sensing element (SE) of the MOEM acceleration transducer:

1 – under the action of a ; 2 – when supplying U_p ;

3 – under the influence of a and U_p

$a = 100 \text{ м/с}^2$ составляет около 430 нм и может быть компенсировано деформацией v_U , обусловленной приложением компенсационного напряжения $U_p = 2.5$ В. Не превышающие сотен нанометров перемещения v свободного края ЧЭ могут быть измерены с помощью модулятора на основе эффекта оптического туннелирования в контуре считывания.

Входное линейное ускорение a и напряжение U_p воздействуют на БМ ПЭ ЧЭ МОЭМ-преобразователя, приводя к деформациям v_a и v_U , которые влияют на ширину рабочего зазора d в считывающем узле, выполненном на основе ОТЭ. Считывающий узел представляет собой ОМ (см. рис. 1) "среда – зазор – среда" и включает в себя призму ПВО, установленную в корпусе неподвижно, и призму с ПП, закрепленную на ЧЭ с начальным зазором d_0 между ней и призмой ПВО. Ширину рабочего зазора d в ОМ можно определить как

$$d(a, U_p) = d_0 - [v_a(a) - v_U(U_p)] = d_0 - v(a, U_p). \quad (3)$$

Изменение субмикрометрового зазора, измеримого с длиной волны ИОИ, влияет на отражательную способность границы сред ОМ, что приводит к нарушению ПВО и переходу части оптической мощности из призмы ПВО в призму с ПП.

Значение отражательной способности R определено через коэффициенты отражения r для волн с перпендикулярной и параллельной поляризацией (направление соответствует индексам коэффициентов) и связано с зазором d [12]:

$$R(d) = \frac{|R_{||}(d)|^2 + |R_{\perp}(d)|^2}{2} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{\sin^2(\varphi_{TE})}{\text{sh}^2[f(d)]}} + \frac{1}{1 + \frac{\sin^2(\varphi_{TM})}{\text{sh}^2[f(d)]}} \right\}; \quad (4)$$

$$\varphi_{TE} = \arctg \left\{ \frac{2n \cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\cos^2 \theta - n^2 [n^2 \sin^2 \theta - 1]} \right\}; \quad (5)$$

$$\varphi_{TM} = \arctg \left[\frac{2n \cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{n^2 \cos^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 1} \right]; \quad (6)$$

$$f(d) = -\frac{2\pi \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\lambda} d, \quad (7)$$

где φ_{TE} – фаза при поперечной электрической поляризации; φ_{TM} – фаза при поперечной магнитной поляризации; n – показатель преломления призмы ПВО и призмы с ПП; θ – угол падения коллимированного оптического излучения на границу сред; λ – длина волны ИОИ в вакууме. Использование формул (4)–(7) правомерно, так как для призмы ПВО и призмы с ПП выбран материал с одинаковым показателем преломления n , а зазор имеет показатель преломления, равный единице.

При выборе начального зазора d_0 МОЭМ-преобразователя ускорения учитывается изменение чувствительности оптического считывающего узла $S(d)$ на основе ОТЭ к перемещениям ЧЭ, которая определяется как

$$S(d) = \frac{\partial R(d)}{\partial d}.$$

Характеристики ОМ с показателем преломления призмы ПВО и призмы с ПП $n = 1.54$; углом падения излучения на границу сред $\theta = 45^\circ$; длиной волны ИОИ $\lambda = 1.55$ мкм представлены на рис. 4: функция преобразования $R(d)$ (1 – красная линия); чувствительность ОМ к зазору $S(d)$ (2 – зеленая линия).

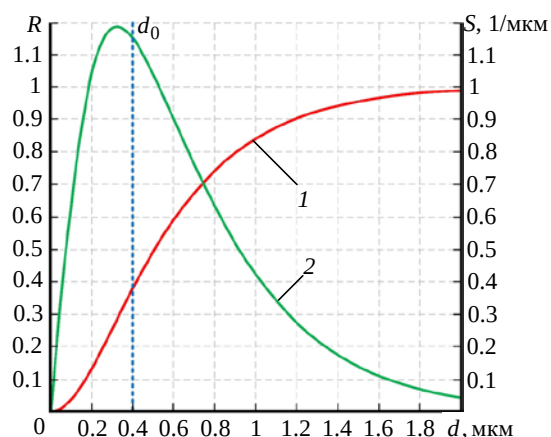


Рис. 4. Характеристики ОМ: 1 – функция преобразования $R(d)$; 2 – чувствительность ОМ к зазору $S(d)$

Fig. 4. Characteristics of the optical modulator (OM): 1 – conversion function $R(d)$; 2 – sensitivity of the optical modulator (OM) to the gap $S(d)$

Ширина начального зазора выбрана равной $d_0 = 0.4$ мкм с учетом близости к середине квазилинейного участка (0.1...0.7 мкм) функции преобразования $R(d)$ для уменьшения погрешности нелинейности и к максимальному значению чувствительности $S(d)$ ОМ.

Изменение отражательной способности $R(d)$ модулирует оптическую мощность P , детектируемую ФП, и фототок I . В ЭБО на выходе трансимпедансного усилителя с электрическим сопротивлением $R_{I/U}$ в контуре ОС в преобразователе "ток–напряжение" формируется напряжение

$$U(d) = -[S_{ФП} P_0 k_{\Pi} R(d) + I_T] R_{I/U}, \quad (8)$$

где $S_{ФП}$ – токовая чувствительность ФП; P_0 – мощность ИОИ; k_{Π} – коэффициент потерь; I_T – темновой ток ФП; $R_{I/U}$ – электрическое сопротивление в контуре ОС в преобразователе "ток–напряжение".

На основе данного напряжения U в ЭБО формируется компенсационное напряжение U_p , подаваемое через контур ОС на БМ ПЭ ЧЭ, и создается сигнал a_3 , эквивалентный измеряемому ускорению, для его передачи через интерфейс.

Результаты. Исследование динамических характеристик компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения. На основе структурной схемы (см. рис. 2) и математической

модели компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения, описываемой уравнениями (1)–(8), для исследования его динамических характеристик определены передаточные функции звеньев, входящих в состав преобразователя.

ЧЭ компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения представлен в виде блока с двумя входами (a , U_p) и одним выходом (v). Математическая модель, описывающая динамическую связь перемещений ЧЭ v_a со входным ускорением a , является дифференциальным уравнением второго порядка:

$$m\ddot{v}_a(t) + K_d\dot{v}_a(t) + Gv_a(t) = ma(t), \quad (9)$$

где m – масса ЧЭ; $K_d = \frac{\mu L^5 b^3}{2d_0^3(L^2 + b^2)}$ – коэффициент демпфирования вдоль оси чувствительности преобразователя; $\mu \approx 1.83 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с) – коэффициент динамической вязкости в зазоре между корпусом и ЧЭ (для воздуха, при температуре 20 °C); $G = \frac{2Ebh^3}{3L^3}$ – жесткость ЧЭ в направлении оси его перемещений.

Из (9) получена передаточная функция $W_a(s) = v_a(s)/a(s)$ перемещений ЧЭ v_a от действующего ускорения a , соответствующая колебательному звену:

$$W_a(s) = \frac{v_a(s)}{a(s)} = \frac{m}{ms^2 + K_d s + G}, \quad (10)$$

а из уравнения (2) – передаточная функция $W_U(s) = v_U(s)/U_p(s)$ перемещений ЧЭ v_U от напряжения в контуре ОС U_p , соответствующая пропорциональному звену:

$$W_U(s) = \frac{v_U(s)}{U_p(s)} = \frac{3d_{31}L^2}{h^2}. \quad (11)$$

Передаточная функция ОМ $W_{OM}(s) = P(s)/d(s)$ имеет нелинейный вид и определяется уравнениями (4)–(8). ФП и преобразователь I/U описываются передаточными функциями апериодического звена первого порядка и имеют вид $W_{ФП}(s) = I(s)/P(s)$ и $W_{I/U}(s) = U(s)/I(s)$ соответственно:

$$W_{ФП}(s) = \frac{I(s)}{P(s)} = \frac{S_{ФП}}{T_{ФП}s + 1}; \quad (12)$$

$$W_{I/U}(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{R_{I/U}}{T_{I/U}s + 1}, \quad (13)$$

где $T_{ФП}$ и $T_{I/U}$ – постоянные времени ФП и преобразователя "ток–напряжение" соответственно.

Для регулятора выбран пропорционально-дифференциальный закон управления, который обеспечивает требуемое качество переходных процессов, и определена передаточная функция:

$$W_p(s) = \frac{U_p(s)}{U(s)} = K_{РД}s + K_{РП}, \quad (14)$$

где $K_{РД}$, $K_{РП}$ – коэффициенты усиления дифференцирующей и пропорциональной составляющих соответственно.

Усилитель и интерфейс описываются передаточной функцией пропорционального звена $W_y(s) = U_y(s)/U_p(s) = K_y$ и $W_{и}(s) = a_3(s)/U_y(s) = K_{и}$, где K_y , $K_{и}$ – коэффициенты усиления усилителя и интерфейса соответственно.

На основе уравнений (10)–(14) получена передаточная функция динамической модели компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения $W(s) = a_3(s)/a(s)$, которая имеет следующий вид:

$$W = W_a \frac{W_{OM}W_{ФП}W_{I/U}W_p}{1 + W_{OM}W_{ФП}W_{I/U}W_pW_U} W_y W_{и}. \quad (15)$$

При исследовании динамической модели МОЭМ-преобразователя ускорения (15) использованы следующие параметры: $P_0 = 8$ мВт; $k_{п} = 0.5$; $S_{ФП} = 0.4$ А/Вт; $R_{I/U} = 7.5$ кОм; $T_{ФП} = 100$ мкс; $T_{I/U} = 100$ мкс.

Исследовано поведение ЧЭ, влияющее на рабочий зазор $d(t)$, под действием измеряемого линейного ускорения $a(t)$, приложенного ступенчато (рис. 5) к преобразователю без ОС (1 – фиолетовая линия и 2 – красная линия) и с ОС (3 – синяя линия и 4 – зеленая линия) и имеющего значения $a_1 = a_3 = 40$ м/с² и $a_2 = a_4 = 100$ м/с² (индексы при a соответствуют номеру линии на графике).

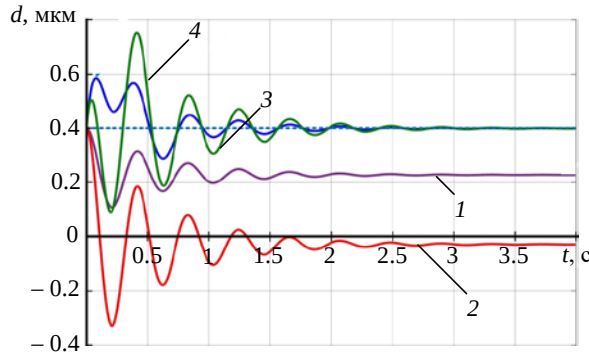


Рис. 5. Переходный процесс изменения зазора ОМ $d(t)$ для преобразователя без ОС (1 и 2) и с ОС (3 и 4):

$$a_1 = a_3 = 40 \text{ м/с}^2; a_2 = a_4 = 100 \text{ м/с}^2$$

Fig. 5. Transient process of gap changing of the OM $d(t)$ for the transducer without feedback (1 and 2) and with feedback (3 and 4): $a_1 = a_3 = 40 \text{ м/с}^2$; $a_2 = a_4 = 100 \text{ м/с}^2$

Для МОЭМ-преобразователя ускорения без ОС значение максимального измеряемого ускорения составляет $a_{\max} = 40 \text{ м/с}^2$, при превышении которого может возникнуть механический контакт между призмой ПВО и призмой с ПП ($d \leq 0$), что недопустимо для данного узла считывания. При использовании ОС с БМ ПЭ ЧЭ и увеличении максимального измеряемого ускорения до $a_{\max} = 100 \text{ м/с}^2$ минимальное значение зазора находится на уровне $d_{\min} \approx 0.1 \text{ мкм}$ и не нарушает корректность функционирования преобразователя.

Переходный процесс выходной величины МОЭМ-преобразователя, которой является зависимость эквивалента ускорения $a_3(t)$ от времени при различных значениях входного ускорения $a(t)$: $a_1 = a_2 = 40 \text{ м/с}^2$; $a_3 = 100 \text{ м/с}^2$, приведен на рис. 6: без ОС (1 – фиолетовая линия); с ОС (2 – синяя линия и 3 – зеленая линия).

Показано, что переходный процесс выходной величины МОЭМ-преобразователя обладает небольшой колебательностью; время регулирования по отклонению от установившегося значения $\Delta a_3 \leq 5\%$ составляет $\tau \approx 1 \text{ мс}$. Преобразователь ускорения с ОС не теряет устойчивости, а погрешность измеренного ускорения в установившемся режиме $\delta a_3 = |a_3 - a|$ находится на уровне округления численных результатов для среды моделирования.

Для определения диапазона допустимых частот входного ускорения компенсационного

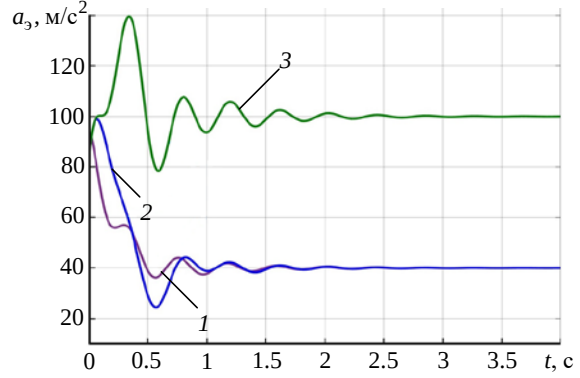


Рис. 6. Переходный процесс выходной величины МОЭМ-преобразователя ускорения $a_3(t)$ без ОС (1)

и с ОС (2 и 3): $a_1 = a_2 = 40 \text{ м/с}^2$; $a_3 = 100 \text{ м/с}^2$

Fig. 6. Transient process of the output value of the MOEM-acceleration transducer $a_3(t)$ without feedback (1) and with feedback (2 and 3): $a_1 = a_2 = 40 \text{ м/с}^2$; $a_3 = 100 \text{ м/с}^2$

МОЭМ-преобразователя исследована его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Наибольшее ограничение на частотный диапазон преобразователя накладывает резонансная частота БМ ПЭ ЧЭ f_p , которая для консольной балки с жесткой заделкой определяется как

$$f_p = \sqrt{\frac{G}{m}} = \sqrt{\frac{2Ebh^3}{3L^3}} = \sqrt{\frac{2Eh^2}{3\rho L^4}}.$$

Значение частоты резонанса ЧЭ МОЭМ-преобразователя ускорения $f_p \approx 2.4 \text{ кГц}$.

На рис. 7 приведены АЧХ $K_A(f)$ ЧЭ (1 – красная линия) и компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения (2 – зеленая линия).

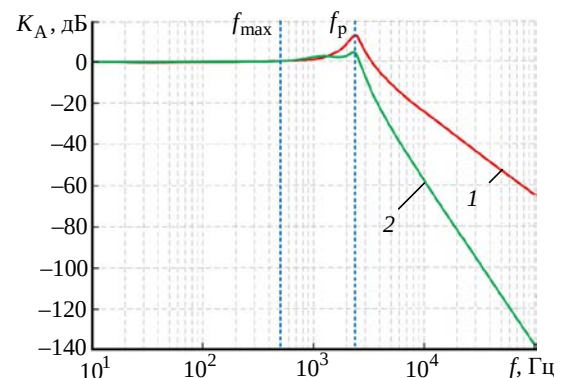


Рис. 7. АЧХ $K_A(f)$: 1 – ЧЭ; 2 – компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения

Fig. 7. Amplitude Frequency Characteristics $K_A(f)$: 1 – of the sensing element (SE); 2 – of the compensator MOEM-acceleration transducer

Введение ОС не сужает частотный диапазон преобразователя; АЧХ разомкнутой системы практически совпадает с АЧХ ЧЭ, минимальные частоты находятся на уровне нуля герц, а максимальные частоты, на которых можно эффективно измерять ускорение, для преобразователя без ОС и с ОС – близки ($f_{\max} \approx 500$ Гц).

Заключение. Предложен подход к улучшению характеристик МЭМ-преобразователя ускорения, заключающийся в совместном использовании прецизионных оптических средств на основе туннельного эффекта в контуре считывания микроперемещений ЧЭ и выполнении ЧЭ из пьезоматериала для стабилизации его положения относительно начального зазора. Разработаны функциональная и структурная схемы компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения. Созданы частные статические математические модели элементов, входящих в состав компенсационного МОЭМ-преобразователя ускорения, получена переда-

точная функция преобразователя ускорения. Определены геометрические параметры ЧЭ и ОМ. Показано, что перемещения ЧЭ находятся в субмикрометровом диапазоне и могут с малой погрешностью быть детектированы ОМ на ОТЭ и компенсированы средствами управляющих воздействий ОС, подаваемых на БМ ПЭ ЧЭ. Доказано, что использование ОС с БМ ПЭ ЧЭ в компенсационном МОЭМ-преобразователе позволяет расширить диапазон измеряемых ускорений в 2.5 раза без нарушения корректности функционирования, потери устойчивости и сужения частотного диапазона. При использовании выбранных параметров время переходного процесса компенсационного МОЭМ-преобразователя находится на уровне $\tau \approx 1$ мс, а максимальная частота входного ускорения $f_{\max} \approx 500$ Гц. Данное исследование может послужить основой для разработки саморегулирующегося модуля линеаризации, позволяющего минимизировать ошибку нелинейности в считывающем узле.

Список литературы

1. Summary of Research Status and Application of MEMS Accelerometers / W. Niu, L. Fang, L. Xu, X. Li, R. Huo, D. Guo, Z. Qi // J. of Computer and Communications. 2018. Vol. 6, iss. 12. P. 215–221. doi: 10.4236/jcc.2018.612021

2. Programmable synchronization enhanced MEMS resonant accelerometer / L. Xu, S. Wang, Z. Jiang, X. Wei // Microsystems Nanoeng. 2020. Iss. 6. Art. num. 63. doi: 10.1038/s41378-020-0170-2

3. Acceleration sensors: Sensing mechanisms, emerging fabrication strategies, materials, and applications / W. Babatain, S. Bhattacharjee, A. M. Hussain, M. M. Hussain // ACS Appl. Electron. Mater. 2021. Vol. 3, № 2. P. 504–531. doi: 10.1021/acsaelm.0c00746

4. Daeichin M., Miles R. N., Towfighian S. Large-stroke capacitive MEMS accelerometer without pull-in // IEEE Sensors J. 2021. Vol. 21, № 3. P. 3097–3106. doi: 10.1109/JSEN.2020.3027270

5. Cascade Synthesis of Observers of Mixed Variables for Flexible Joint Manipulators Tracking Systems under Parametric and External Disturbances / S. A. Krasnova, A. S. Antipov, D. V. Krasnov, A. V. Utkin // Electronics. 2023. Vol. 12, iss. 8. P. 1930. doi: 10.3390/electronics12081930

6. Kokunko Yu. G., Krasnov D. V., Utkin A. V. Two Methods for Synthesis of State and Disturbance Observers for an Unmanned Aerial Vehicle // Automation and Remote Control. 2021. Vol. 82, № 8. P. 1426–1441. doi: 10.1134/S0005117921080099

7. Review of Micromachined Optical Accelerometers: From mg to Sub- μ g / Q. Lu, Y. Wang, X. Wang.

Y. Yao, X. Wang, W. Huang // Opto-Electron. Adv. 2021. Vol. 4, № 3. P. 200045. doi: 10.29026/oea.2021.200045

8. Sundar S., Gopalakrishna K., Thangadurai N. MOEMS-Based Accelerometer Sensor Using Photonic Crystal for Vibration Monitoring in an Automotive System // Int. J. Comput. Aided Eng. Technol. 2021. Vol. 14, № 2. doi: 10.1504/IJCAET.2021.113546

9. Progress of optomechanical micro/nano sensors: a review / X. Liu, W. Liu, Z. Ren, Y. Ma, B. Dong, G. Zhou, C. Lee // Int. J. Optomechatronics. 2021. Vol. 15, № 1. P. 120–159. doi: 10.1080/15599612.2021.1986612

10. Zhang Z., Xin C. A Proposal for an Ultra-compact Single-Layer MOEMS Accelerometer Based on Evanescent Coupling between Parallel Silicon Nanowaveguides // Asia Communications and Photonics Conf. (ACP), Shenzhen, China, 05–08 Nov. 2022. IEEE, 2022. P. 1998–2001. doi: 10.1109/ACP55869.2022.10088753

11. Бусурин В. И., Коробков К. А., Шлеенкин Л. А. Метод "грубо-точного" считывания для преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем // Датчики и системы. 2020. № 8. С. 27–34. doi: 10.25728/datsys.2020.8.4

12. Исследование компенсационного преобразователя ускорения с дифференциальным оптическим считыванием / В. И. Бусурин, С. Г. Штек, В. В. Коробков, М. А. Жеглов, К. А. Коробков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 3. С. 29–38. doi: 10.25791/pribor.3.2021.1247

13. Precision tracking control of a piezoelectric-actuated system / J. C. Shen, W. Y. Jywe, H. K. Chiang, Y. L. Shu // *Precis. Eng.* 2008. Vol. 32, iss. 2. P. 71–78. doi: 10.1016/j.precisioneng.2007.04.002

14. Ballas R. G. Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensor Integration // *Series: Microtechnolo-*

gy and MEMS. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 358 p. doi: 10.1007/978-3-540-32642-7

15. Development of a Micro-Gripper Using Piezoelectric Bimorphs / A. M. El-Sayed, A. Abo-Ismael, M. T. El-Melegy, N. A. Hamzaid, N. A. A. Osman // *Sensors.* 2013. Vol. 13, iss. 5. P. 5826–5840. doi: 10.3390/s130505826

Информация об авторах

Бусурин Владимир Игоревич – доктор технических наук (1993), профессор (1995), профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов: современные оптоэлектронные датчики; преобразователи угловых скоростей и линейных ускорений; волоконно-оптические преобразователи; микроэлектромеханические системы; алгоритмы компенсации погрешностей.

Адрес: Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия

E-mail: vbusurin@mai.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9452-5785>

Коробков Кирилл Андреевич – кандидат технических наук (2022), доцент кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов: современные оптоэлектронные датчики; преобразователи угловых скоростей и линейных ускорений; волоконно-оптические преобразователи; микроэлектромеханические системы; алгоритмы компенсации погрешностей.

Адрес: Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия

E-mail: kane_and_lynch@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9644-4348>

Зо Лвин Хту – магистр по направлению "Управление в технических системах" (2020, Московский авиационный институт), аспирант кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института. Автор семи научных публикаций. Сфера научных интересов: современные оптоэлектронные датчики; преобразователи угловых скоростей и линейных ускорений; волоконно-оптические преобразователи; микроэлектромеханические системы; алгоритмы компенсации погрешностей.

Адрес: Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия

E-mail: zawlwinhtoo57@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-1108-8275>

References

1. Niu W., Fang L., Xu L., Li X., Huo R., Guo D., Qi Z. Summary of Research Status and Application of MEMS Accelerometers. *J. of Computer and Communications.* 2018, vol. 6, iss. 12, pp. 215–221. doi: 10.4236/jcc.2018.612021

2. Xu L., Wang S., Jiang Z., Wei X. Programmable Synchronization Enhanced MEMS Resonant Accelerometer. *Microsystems Nanoeng.* 2020, iss. 6, art. num. 63. doi: 10.1038/s41378-020-0170-2

3. Babatain W., Bhattacharjee S., Hussain A. M., Hussain M. M. Acceleration Sensors: Sensing Mechanisms, Emerging Fabrication Strategies, Materials, and Applications. *ACS Appl. Electron. Mater.* 2021, vol. 3, no. 2, pp. 504–531. doi: 10.1021/acsaem.0c00746

4. Daeichin M., Miles R. N., Towfighian S. Large-Stroke Capacitive MEMS Accelerometer without Pull-in. *IEEE Sensors J.* 2021, vol. 21, no. 3, pp. 3097–3106. doi: 10.1109/JSEN.2020.3027270

5. Krasnova S. A., Antipov A. S., Krasnov D. V., Utkin A. V. Cascade Synthesis of Observers of Mixed Variables for Flexible Joint Manipulators Tracking Systems under Parametric and External Disturbances. *Electronics.* 2023, vol. 12, iss. 8, p. 1930. doi: 10.3390/electronics12081930

6. Kokunko Yu. G., Krasnov D. V., Utkin A. V. Two Methods for Synthesis of State and Disturbance Observers for an Unmanned Aerial Vehicle. *Automation and Remote Control.* 2021, vol. 82, no. 8, pp. 1426–1441. doi: 10.1134/S0005117921080099

7. Lu Q., Wang Y., Wang X., Yao Y., Wang X., Huang W. Review of Micromachined Optical Accelerometers: From mg to Sub- μ g. *Opto-Electron. Adv.* 2021, vol. 4, no. 3, p. 200045. doi: 10.29026/oea.2021.200045

8. Sundar S., Gopalakrishna K., Thangadurai N. MOEMS-Based Accelerometer Sensor Using Photonic Crystal for Vibration Monitoring in an Automotive System. *Int. J. Comput. Aided Eng. Technol.* 2021, vol. 14, no. 2. doi: 10.1504/IJCAET.2021.113546

9. Liu X., Liu W., Ren Z., Ma Y., Dong B., Zhou G., Lee C. Progress of Optomechanical Micro/Nano Sensors: a Review. *Int. J. Optomechanics.* 2021, vol. 15, no. 1, pp. 120–159. doi: 10.1080/15599612.2021.1986612

10. Zhang Z., Xin C. A Proposal for an Ultracompact Single-Layer MOEMS Accelerometer Based on Evanescent Coupling between Parallel Silicon Nanowaveguides. *Asia Communications and Photonics Conf. (ACP), Shenzhen, China, 05–08 Nov. 2022. IEEE, 2022, pp. 1998–2001. doi: 10.1109/ACP55869.2022.10088753*

11. Busurin V. I., Korobkov K. A., Shleenkin L. A. "Roughly-Accurate" Reading Method for a Acceleration Transducer with an Adaptable Optical Module. *Sensors and systems*. 2020, no. 8, pp. 27–34. doi: 10.25728/datsys.2020.8.4

12. Busurin V. I., Shtek S. G., Korobkov V. V., Zheglov M. A., Korobkov K. A. Research of Compensation Acceleration Transducer With Differential Optical Reading. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2021, no. 3, pp. 29–38. doi: 10.25791/pribor.3.2021.1247

13. Shen J. C., Jywe W. Y., Chiang H. K., Shu Y. L. Precision Tracking Control of a Piezoelectric-Actuated

System. *Precis. Eng.* 2008, vol. 32, iss. 2, pp. 71–78. doi: 10.1016/j.precisioneng.2007.04.002

14. Ballas R. G. Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensor Integration. *Microtechnology and MEMS*. Berlin, Springer-Verlag, 2007, 358 p. doi: 10.1007/978-3-540-32642-7

15. El-Sayed A. M., Abo-Ismael A., El-Melegy M. T., Hamzaid N. A., Osman N. A. A. Development of a Micro-Gripper Using Piezoelectric Bimorphs. *Sensors*. 2013, vol. 13, iss. 5, pp. 5826–5840. doi: 10.3390/s130505826

Information about the authors

Vladimir I. Busurin, Dr Sci. (Eng.) (1993), Professor (1995), Professor of the Department of Automatic and Intelligent Control Systems of Moscow Aviation Institute (National Research University). The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: modern optoelectronic sensors; angular velocity and linear acceleration transducers; fiber-optic transducers; microelectromechanical systems; error compensation algorithms.

Address: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia

E-mail: vbusurin@mai.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9452-5785>

Kirill A. Korobkov, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Associate Professor of the Department of Automatic and Intelligent Control Systems of Moscow Aviation Institute (National Research University). The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: modern optoelectronic sensors; angular velocity and linear acceleration transducers; fiber-optic transducers; microelectromechanical systems; error compensation algorithms.

Address: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia

E-mail: kane_and_lynch@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9644-4348>

Zaw Lwin Htoo – Master in Control in Technical Systems (2020, Moscow Aviation Institute (National Research University)); Postgraduate of the Department of Automatic and Intelligent Control Systems of Moscow Aviation Institute (National Research University). The author of 7 scientific publications. Area of expertise: modern optoelectronic sensors; angular velocity and linear acceleration transducers; fiber-optic transducers; microelectromechanical systems; error compensation algorithms.

Address: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia

E-mail: zawlwinhtoo57@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-1108-8275>