

ИНФОРМАТИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 681.1.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184067>

EDN: <https://www.elibrary.ru/OQFCPF>

ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ОБЕЗВЕШИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ MATLAB SIMULINK

**Валентин Николаевич Максимов¹✉, Кирилл Валерьевич Кондратьев²,
Николай Васильевич Матюха³, Павел Николаевич Максимов⁴**

^{1,2,3,4}АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

¹1928d@mail.ru✉

²kondratevkv@iss-reshetnev.ru

³1528d@mail.ru

⁴maksimovpn@iss-reshetnev.ru

Аннотация. В данной работе была разработана имитационная модель активной системы обезвешивания, созданная в среде MATLAB Simulink. Активная система обезвешивания необходима для успешного проведения модальных испытаний аэрокосмической техники. Построенная модель подробно описывает работу системы, основанной на использовании магнитной энергии. Основными элементами системы являются катушка, магнит, стальной корпус, стальной диск, взаимодействие которых обеспечивает эффективное и стабильное функционирование системы. Постоянный

магнит создаёт магнитное поле, которое, взаимодействуя с медной катушкой, позволяет генерировать электромагнитные силы. Эти силы играют ключевую роль в управлении движением катушки и её положением в пространстве, что делает данную систему способной регулировать положения объекта. Основной целью разработки модели было проведение анализа поведения системы в зависимости от положения катушки. Это важно для создания точной и надёжной имитационной модели, которая отражает реальную динамику системы в различных условиях эксплуатации. Результаты позволили провести подробный анализ переходного процесса в системе. В рамках анализа были рассмотрены такие важные характеристики, как время переходного процесса, величина перерегулирования и интегральная устойчивость системы. Полученные данные играют важную роль для дальнейшего совершенствования системы обезвешивания, а также разработки методов управления, которые обеспечат её надёжную эксплуатацию в реальных условиях.

Ключевые слова: сила Ампера, моделирование, MATLAB Simulink, электродинамика, переходной процесс, активные системы обезвешивания, математическая модель

Для цитирования: Максимов В.Н., Кондратьев К.В., Матюха Н.В., Максимов П.Н. Построение имитационной модели системы обезвешивания с использованием среды MATLAB Simulink // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184067>

COMPUTER SCIENCE, MODELING AND MANAGEMENT

Original article

CONSTRUCTION OF A SIMULATION MODEL OF A DEWEIGHTING SYSTEM USING THE MATALB SIMULINK ENVIRONMENT

Valentin N. Maksimov¹✉, Kririll V. Kondratyev², Nikolay V. Matyukha³,
Pavel N. Maksimov⁴

^{1,2,3,4}JSC “Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems”,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

¹1928d@mail.ru✉

²kondratevkv@iss-reshetnev.ru

³1528d@mail.ru

⁴maksimovpn@iss-reshetnev.ru

Abstract. In this work, a simulation model of an active dewatering system was developed, created in the MATLAB Simulink environment, an active dewatering system is necessary for the successful conduct of modal tests of aerospace equipment. The constructed model describes in detail the operation of a system based on the use of magnetic energy. The main elements of the system are a coil, a magnet, a steel body, a steel disc, the interaction of which ensures the efficient and stable operation of the system. A permanent magnet creates a magnetic field, which, interacting with a copper coil, allows the generation of electromagnetic forces. These forces play a key role in controlling the movement of the coil and its position in space, which makes this system capable of adjusting the position of the object. The main purpose of the model development was to analyze the behavior of the system depending on the position of the coil. This is important to create an accurate and reliable simulation model that reflects the real dynamics of the system in various operating conditions. The results allowed for a detailed analysis of the transition process in the system.

As part of the analysis such important characteristics as the time of the overshoot process, the amount of overshoot and the integral stability of the system were considered. The data obtained play an important role for further improvement of the dewatering system, as well as the development of management methods that will ensure its reliable operation in real conditions.

Keywords: Ampere force, modeling, MATLAB Simulink, electromagnetic field, transient process, active weight-loss systems, mathematical model

For citation: Maksimov V.N., Kondratyev K.V., Matyukha N.V., Maksimov P.N. Construction of a simulation model of a dewatering system using the MATLAB Simulink environment. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184067>

Введение

При проведении модальных испытаний аэрокосмической техники необходимо, чтобы условия испытаний были максимально приближены к реальным условиям работы изделия. Наиболее важным условием является невесомость. Для имитации невесомости используются системы обезвешивания, компенсирующие силу притяжения, действующую на изделие.

Активная система обезвешивания – это сложная система с датчиками и двигателями, предназначенная для компенсации силы тяжести на основе сигналов обратной связи. Имеется несколько видов данных систем:

1. Электромеханические (приводы) [1-3];
2. Магнитные;

3. Системы на основе пружинно-канатных конструкций [4].

Наибольший интерес представляют магнитные системы с постоянными магнитами. За счёт сильного магнитного поля они способны при малых токах создавать значительную компенсирующую силу [5-7]. Это позволяет значительно уменьшить габариты системы. Также значительным плюсом является способность работать в условиях полного вакуума.

В данной работе будет рассмотрена электромагнитная система, предназначенная для модальных испытаний низкочастотной и слабодепфированной конструкции с собственной частотой в диапазоне от 0,1 до 0,2 Гц с массой не более 7 кг. В случае если масса изделия выше допустимого значения, то конструкция делится на элементы, к каждому из которых присоединяется система компенсации веса, масса элемента не должна превышать 7 кг. Электромагнитная система обезвешивания состоит из стального корпуса (1), постоянного магнита (2) и медной катушки (3), стального диска (4). Схема изображена на рис. 1.

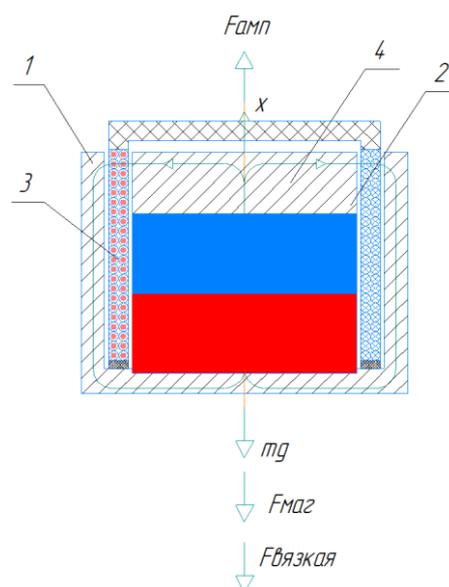


Рис. 1. Электромагнитная система.

Катушка подключена к источнику постоянного напряжения. В результате подачи тока в катушку, на неё начинает действовать сила Ампера. Данная сила будет перемещать катушку вверх или вниз, в зависимости от направления тока. При положительном перемещении катушки по координате x , магнитное сопротивление последней будет увеличиваться, а индуктивность уменьшится. При отрицательном направлении наоборот магнитное сопротивление уменьшится, а индуктивность увеличится [8]. В определенный момент, когда сила Ампера сравняется с силой тяжести, система придет в равновесие. В данный момент катушка будет обезвешена.

Основной целью моделирования – это проведение анализа поведения системы в зависимости от положения катушки и получение зависимостей изменения таких характеристик как напряжения, силы тока, индуктивности и силы.

Математическая модель

Электротехническая подсистема описывается вторым законом Кирхгофа [9]:

$$U = RI + \frac{d(L(x)I)}{dt} - B \cdot l_{\text{cp}} \cdot \frac{dx}{dt}$$

где U – напряжение в цепи, R – сопротивление, I – сила тока в цепи, где l_{cp} – средняя длина одного витка соленоида, B – магнитная индукция постоянного магнита, L – индукция катушки

Производную произведения индуктивности и тока можно записать как:

$$\frac{d(L(x)I)}{dt} = L(x) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(x)}{dt} = L(x) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt};$$

В итоге получаем:

$$U = RI + L(x) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} - B \cdot l_{\text{пр}} \cdot \frac{dx}{dt};$$

Выразим уравнение относительно производной силы тока по времени:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L(x)} \left(U - RI - I \frac{dL(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + B \cdot l_{\text{пр}} \cdot \frac{dx}{dt} \right); \quad (1)$$

Механическая подсистема описывается вторым законом Ньютона:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_{\text{амп}} - F_{\text{вязкая}} - mg - F_{\text{маг}};$$

где m – масса катушки, $F_{\text{амп}}$ – сила Ампера, $F_{\text{вязкая}}$ – сила вязкого трения $F_{\text{маг}}$ – магнитная сила создаваемая катушкой.

Сила Ампера равна:

$$F_{\text{амп}} = I \cdot l_{\text{пр}} \cdot B;$$

где $l_{\text{пр}}$ – длина проволоки, пересекающая магнитный потока от постоянного магнита.

Сила вязкого трения:

$$F_{\text{вязкая}} = c \cdot \frac{dx}{dt};$$

где c – коэффициент сопротивления.

Магнитная сила, создаваемая катушкой:

$$F_{\text{маг}} = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{dL(x)}{dx};$$

Тем самым имеем:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \left(I \cdot l_{\text{пр}} \cdot B - c \cdot \frac{dx}{dt} - mg - \frac{I^2}{2} \cdot \frac{dL(x)}{dx} \right) \cdot \frac{1}{m}; \quad (2)$$

Постоянный магнит описывается вторым уравнением Максвелла [10]:

$$\oint_l H dl = H_{ст} \cdot l_{ст} + H_B \cdot l_B = 0;$$

где $H_{ст}$ – напряжённость магнитного поля постоянного магнита в стали, H_B – напряжённость магнитного поля постоянного магнита в зазоре, $l_{ст}$ – участок циркуляции магнитного поля в стали, l_B – участок циркуляции магнитного поля в зазоре.

$$H_{ст} = -\frac{H_B \cdot l_B}{l_{ст}};$$

$$H_{ст} = -\frac{B_B \cdot l_B}{\mu_B \mu_0 \cdot l_{ст}};$$

где B_B – индукция магнитного поля от постоянного магнита в воздухе.

Так как вектор индукции магнитного поля выходит по нормали в зазор, то:

$$B_B = B_{ст};$$

где $B_{ст}$ – индукция магнитного поля от постоянного магнита в стали.

$$H_{ст} = -\frac{B_{ст} \cdot l_B}{\mu_B \mu_0 \cdot l_{ст}};$$

$$B_{ст} = -\frac{H_{ст} \cdot \mu_B \mu_0 \cdot l_{ст}}{l_B};$$

Разные знаки магнитной напряжённости и магнитной индукции в стали означает, что при наличии воздушного зазора магнитная индукция в стали меньше остаточной магнитной индукции:

$$B_{ст} = B_r + \mu_0 H;$$

При

$$H < 0;$$

Остаточная индукция имеет следующую формулу [11]:

$$B_r = \mu_0 \cdot M;$$

где M – намагниченность постоянного магнита.

Так как отрицательному значению напряженности магнитного поля соответствует положительное значение магнитной индукции, то магнитное состояние магнитопровода определяется по кривой размагничивания, левая верхняя часть петли гистерезиса [12-13]. В нашем случае, зная геометрические характеристики магнита рассчитаем его в программе AnsysMaxwell. Магнитный поток, создаваемый магнитом равен 0.0031 Вб. Магнитный поток есть скалярное произведение вектора магнитной индукции и нормального вектора площади. В данной модели эти вектора имеют одинаковое направление, следовательно, магнитный поток можно записать простой формулой:

$$\Phi_{ст} = B_{ст} \cdot S_{ст};$$

где $S_{ст}$ – площадь сечения в стали которое пересекает магнитный поток.

Магнитная индукция вычисляется как:

$$B_{в} = B_{ст} = \frac{\Phi_{ст}}{S_{ст}} = \frac{0,0031}{0,0044} = 0,704 \text{ Тл};$$

Так как магнитный поток, проходящий через сталь и воздух есть один и тот же поток и вектор магнитной индукции в стали равен вектору магнитной индукции в зазоре. То следовательно сечение, пересекающееся с магнитным потоком, в воздушном зазоре равно сечению в стали

$$S_{в} = S_{ст};$$

При движении катушки из начального положения, сечение через которое проходит вектор B_B меняется:

$$S_{\text{раб}} = \pi D_{\text{ср}} \cdot (b_{\text{min}} + x);$$

где b_{min} – минимальная ширина катушки, пересекающая магнитный поток, $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр соленоида.

Но в определенный момент времени рабочее сечение катушки сравнивается с сечением через которое проходит магнитный поток и это будет её максимальное значение:

$$S_{\text{max.раб}} = S_B = \pi D_{\text{ср}} \cdot b_{\text{max}};$$

где b_{max} – максимальная ширина катушки, пересекающая магнитный поток.

Графически это изображено на рис. 2.

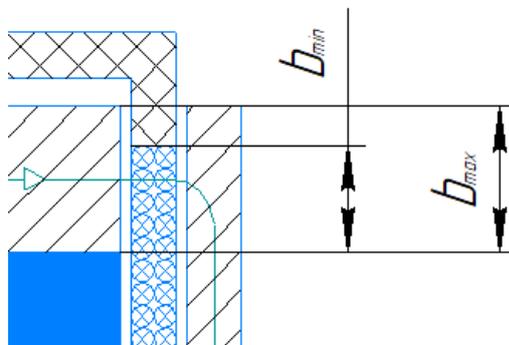


Рис. 2. Особенности работы катушки.

Длина проволоки, которая пересекает магнитный поток от постоянного магнита, находится по следующей формуле:

$$l_{\text{пр}} = 2\pi N(4R_1 + 6d_{\text{пр}});$$

где R_1 – радиус первого слоя обмотки, $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, N – число витков, пересекающих магнитный поток:

$$N = \frac{b_{\min} + x}{d_{\text{пр}}}; \quad (3)$$

Максимальное количество витков, пересекающих магнитный поток равно:

$$N_{\max} = \frac{b_{\max}}{d_{\text{пр}}}; \quad (4)$$

Так как катушка движется относительно постоянного магнита и стального корпуса, то индуктивность является сложной функцией, зависимой не только от длины циркуляции напряженности магнитного поля и площади поперечного сечения как магнитопровода, так и воздушного зазора, но зависимой также и от перемещения. В силу сложности расчёта этой функции аналитическим путем для данной конструкции, произведем замер индуктивности катушки в разных положениях, после чего аппроксимируем полиномом по методу наименьших квадратов. Электрическая схема замера индуктивности приведена на рис. 3

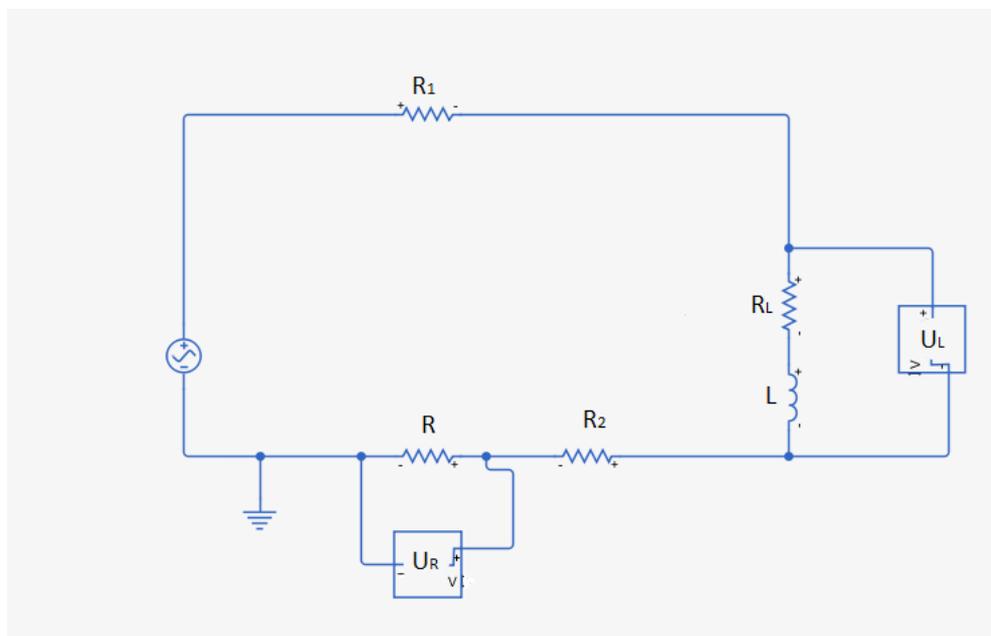


Рис. 3. Электрическая схема.

Данная система описывается вторым законом Кирхгофа:

$$u(t) = [R_1 + R_L + R_2 + R] \cdot i(t) + L \frac{di}{dt};$$

где $u(t)$ – напряжение в цепи, $i(t)$ – ток в цепи, R_1 и R_2 – сопротивление проводов, R_L – сопротивление катушки, R – сопротивление резистора, L – индуктивность катушки.

Для облегчения расчёта перейдем из временной в частотную область:

$$U(i\omega) = [R_1 + R_L + R_2 + R] \cdot I(i\omega) + LI(i\omega) \cdot i\omega;$$

Тем самым ток имеет следующую зависимость:

$$I(i\omega) = \frac{U(i\omega)}{R_1 + R_L + R_2 + R + L \cdot i\omega};$$

Измерив напряжение на резисторе и катушке, которые равны:

$$u_R(t) = R \cdot i(t);$$

$$u_L(t) = R_L \cdot i(t) + L \frac{di}{dt};$$

И переведа их в частотную область:

$$U_R(i\omega) = R \cdot I(i\omega);$$

$$U_L(i\omega) = R_L \cdot I(i\omega) + LI(i\omega) \cdot i\omega;$$

Сможем получить передаточную функцию, где остается только импеданс катушки и сопротивление резистора.

$$\frac{U_L(i\omega)}{U_R(i\omega)} = \frac{R_L \cdot I(i\omega) + LI(i\omega) \cdot i\omega}{R \cdot I(i\omega)} = \frac{R_L + L \cdot i\omega}{R} = \frac{Z}{R};$$

где Z – импеданс катушки.

Сопротивление катушки будет реальной частью импеданса, а индуктивность мнимой частью импеданса делёного частоту ω :

$$\operatorname{Re}(Z) = R_L;$$

$$\frac{\operatorname{Im}(Z)}{\omega} = L;$$

Главной проблемой замера индуктивности является стальной диск, который накрывает магнит, изображенный на рис. 1. При высокой частоте колебаний переменного тока, в нём индуцируются токи, создающие магнитное поле, взаимодействующее с магнитным полем катушки. В результате чего магнитный поток катушки меняется вместе с индуктивностью. Для минимизации данного эффекта замер индуктивности производился при довольно низкой частоте.

Зависимость индуктивности от перемещения при частоте переменного тока в 0,1 Гц, а также её аппроксимация, представлена на рис. 4

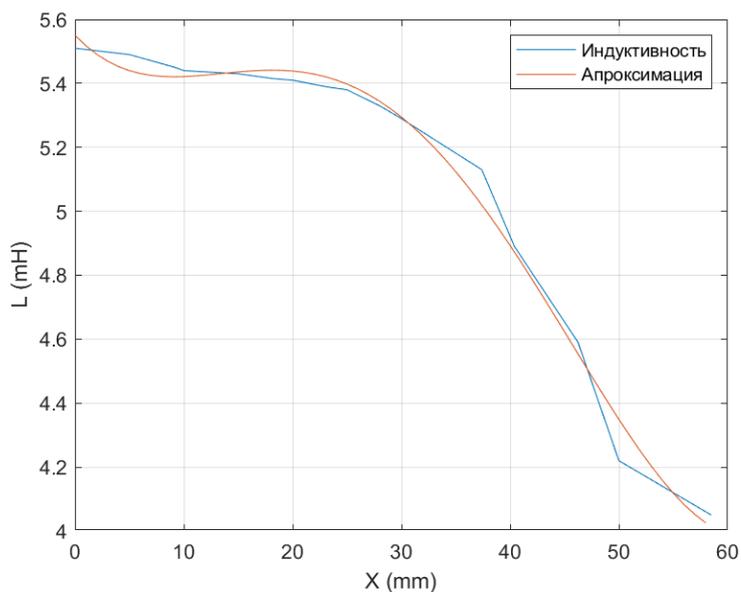


Рис. 4. Зависимость индуктивности от перемещения.

Аппроксимация зависимости индуктивности L от перемещения x на рис. 4 выполнена полиномом четвёртого рода, и дает следующую функцию:

$$L(x) = 883,33x^4 - 104,36x^3 + 3,24x^2 - 0,035x + 0,0056; \quad (5)$$

Производная индуктивности по перемещению будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dL(x)}{dx} = 3,53 \cdot 10^3 x^3 - 313,10x^2 + 6,49x - 0,0358; \quad (6)$$

Имитационная модель

Полный рабочий диапазон катушки $x_{\text{раб.}}$ составляет 4 см. В рамках моделирования была поставлена задача установить катушку в среднее положение $x_{\text{сред.}}$ равное 2 см, и удерживать её в этом состоянии. Для реализации данной задачи в схему была интегрирована система управления с использованием ПИД-регулятора с обратной связью, которая отвечает за регулировку входного напряжения. Это позволило стабилизировать положение катушки на заданной высоте и обеспечивать её устойчивость в ходе всего процесса. На основании дифференциальных уравнений (1) и (2) была построена имитационная модель. Данная модель создана в среде MATLAB Simulink [14-20] и представлена на рис. 5.

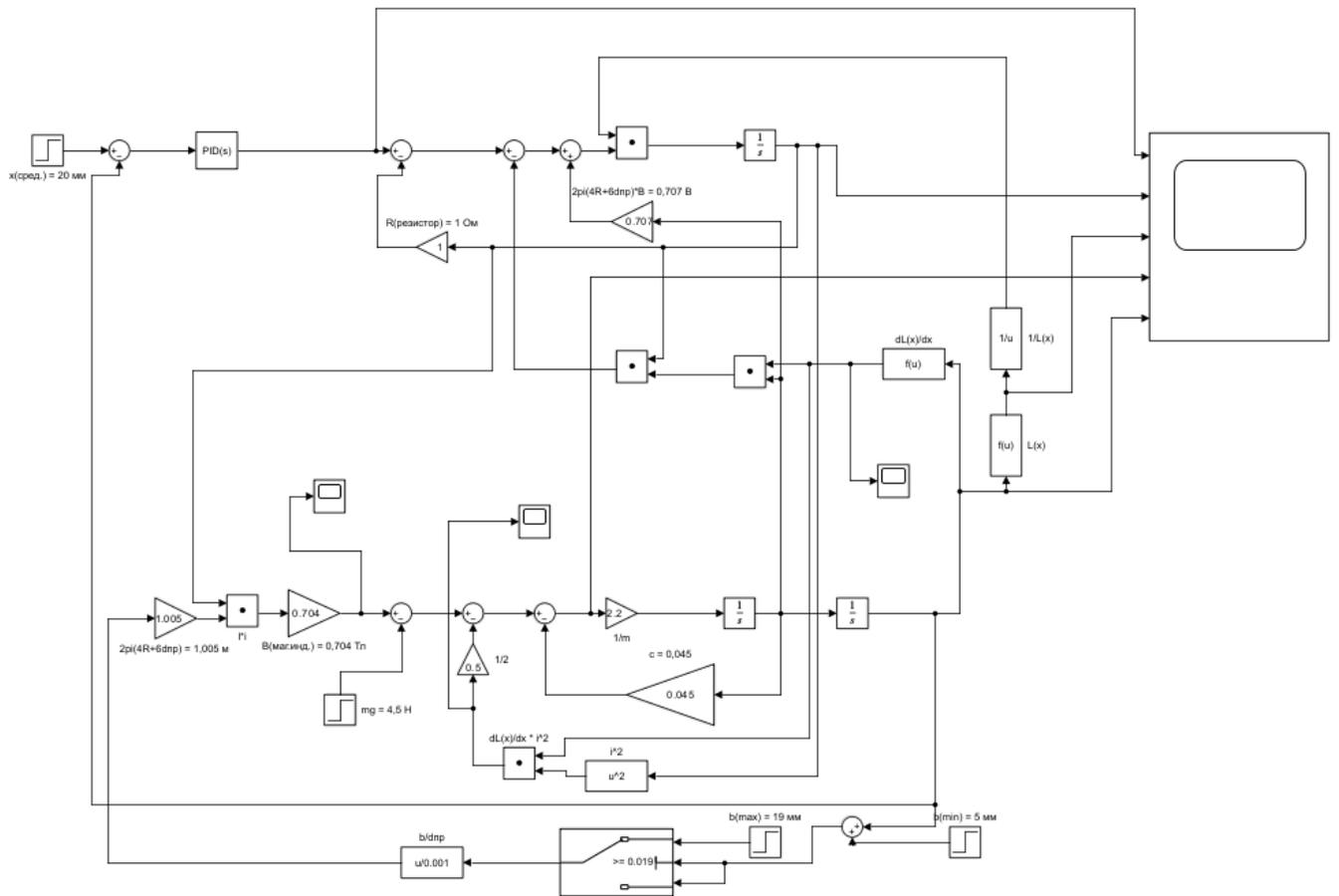


Рис. 5. Имитационная модель.

Испытываемая конструкция должна быть слабодемпфированная, в нашем случае было решено выбрать коэффициент демпфирования σ равный 0,05. Масса m в модели равна 0,45 кг. Коэффициент вязкого трения рассчитывается по следующей формуле.

$$c = 2\sigma m = 0.045$$

Модель включает блок *Switch*, который отвечает за изменение количества активных витков катушки в зависимости от её перемещения, что описывается согласно уравнению (3). При этом количество рабочих витков не может превышать максимальное значение, определённое уравнением (4). Блок $L(x)$ включает в себя уравнение (5), а блок $dL(x)/dx$ уравнение (6). ПИД-регулятор, используемый в

симуляции, и обеспечивающий корректировку входного напряжения на основе отклонений от заданного положения катушки имеет следующие характеристики:

1. Контроллер – *PID*.

2. Форма регулятора – *Parallel*, описываемая следующим уравнением.

$$P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{1}{s}} ;$$

где пропорциональный коэффициент $P = 35$, интегральный коэффициент $I = 170$, дифференциальный коэффициент $D = 2$, коэффициент фильтра $N = 100$.

3. Временная область – *Continuous time*.

Результаты симуляции

Результаты симуляции представлены на рис.6

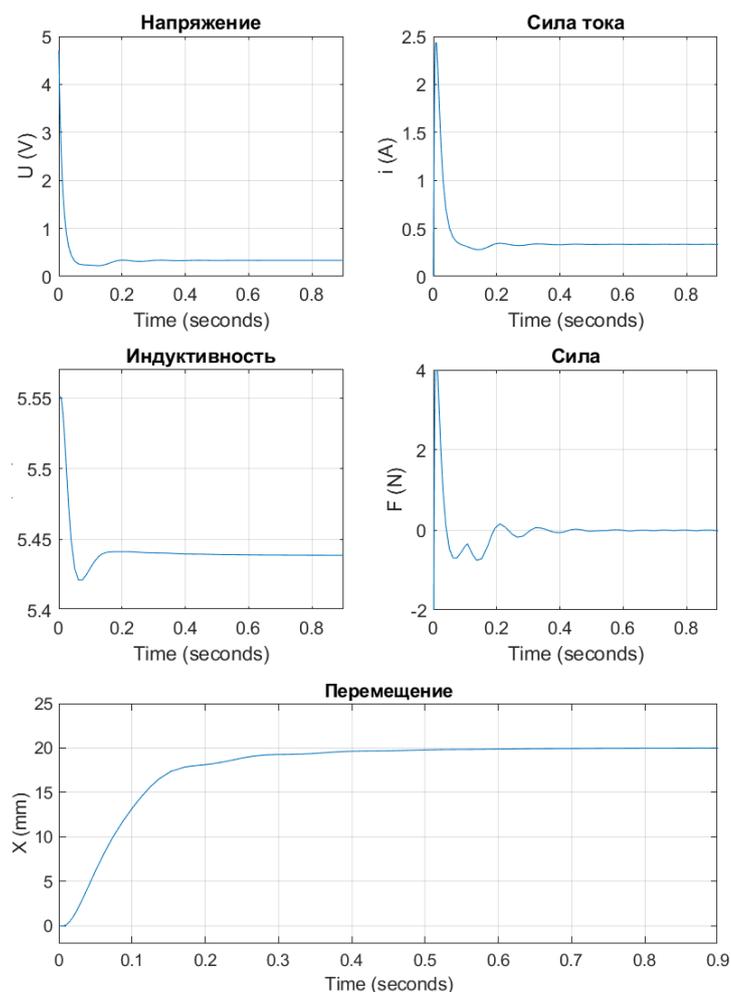


Рис. 6. – Результат симуляции.

Переходный процесс представляет собой быстро затухающие гармонические колебания. Перемещение в начальный момент времени имеет резкий подъем достигая максимального значения около 18,2 мм. за 0,17 секунды, после чего наблюдаются небольшие колебания в периоде с 0,17 по 0,4 секунды. После колебаний система выходит на стационарный режим, где перемещение объекта остаётся практически постоянным на уровне около 20 мм. Колебания почти отсутствуют, что указывает на то, что объект достиг своего окончательного положения.

Переходя к анализу переходного процесса по перемещению, сделаем несколько оценок относительно его качества:

1. Время подъема $t_r = 0,17$ с;
2. Время переходного процесса $t_s = 0,4$ с;
3. Квадратичная интегральная оценка $J = 25,02$.

Экспериментальная модель

В целях оценки модели, была собрана экспериментальная система компенсации веса с аэростатическим подшипником [21]. Данная система изображена на рис. 7.



Рис. 7. – Экспериментальная система обезвешивания.

В данной конструкции к аэростатическому подшипнику был присоединён оптический энкодер OEM-001U-01. К подвижной части, состоящей из катушки и штока, была прикреплена магнитная линейка. Программа управления, разработанная на языке C++ и включающая в себя ПИД-регулятор, была загружена в микроконтроллер Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3.

На данной материальной части происходило обезвешивание подвижной части системы, после чего данные сравнивались с данными модели. Экспериментальные и теоретические данные представлены на рис. 8.

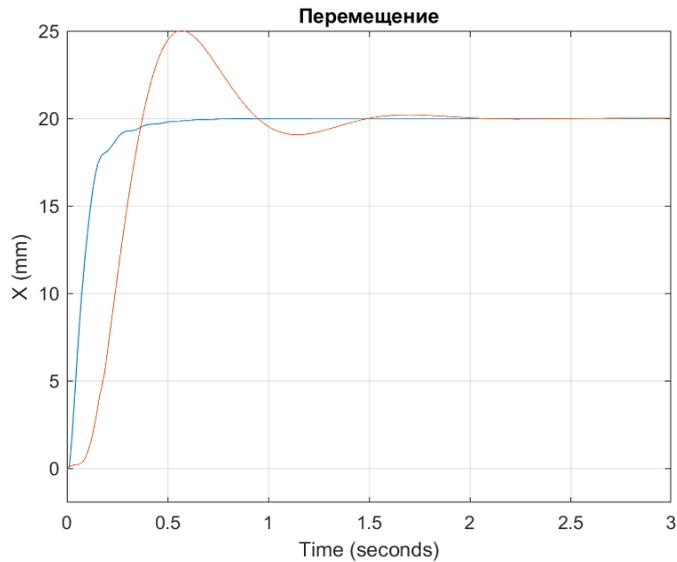


Рис. 7. – Экспериментальные и расчётные данные.

Переходный процесс экспериментальной модели представляет собой затухающие гармонические колебания. Перемещение в начальный момент времени имеет резкий подъем, достигая максимального значения около 25 мм за 0,56 секунды, после чего наблюдаются колебания в периоде с 0,56 по 1,5 секунды. После колебаний система выходит на стационарный режим, где перемещение объекта остаётся практически постоянным на уровне около 20 мм. Колебания почти отсутствуют, что указывает на то, что объект достиг своего окончательного положения. Качество переходного процесса можно выразить следующими значениями:

1. Коэффициент перерегулирование $\eta = 0,25$;
2. Время подъема $t_r = 0,56$ с;
3. Время переходного процесса $t_s = 1,5$ с;
4. Квадратичная интегральная оценка $J = 82,7$.

Характеристики переходного процесса в экспериментальной модели отличаются от параметров имитационной модели, реализованной в MATLAB

Simulink. Это обусловлено как выбором коэффициентов ПИД-регулятора, так и неполнотой модели, в частности, сложностью учёта нелинейных процессов, возникающих при взаимодействии постоянного магнита с катушкой индуктивности.

Заключение

В данной работе была разработана и исследована имитационная модель активной системы обезвешивания с использованием среды MATLAB Simulink. В ходе моделирования были получены зависимости напряжения, силы тока, индуктивности, а также силы от перемещения. Также проанализирована и оценена такая ключевая характеристика системы, как переходной процесс. Был собран экспериментальный образец системы обезвешивания и оценен его переходной процесс. Результаты сравнения экспериментальной и теоретической переходной характеристики, показали, что коэффициенты их качества отличаются. Но существенно они не влияют на процесс обезвешивания. В дальнейшем стоит задача как доработать имитационную модель, так и произвести более точную настройку ПИД – регулятора, и оптимизация кода программы управления, для ускорения процесса управления.

Список источников

1. Иванов А.В., Зоммер С.А. Анализ процесса раскрытия зонтичного рефлектора на стенде с активной системой обезвешивания // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5, № 4 (38). С. 208-216. DOI: [10.26732/j.st.2021.4.04](https://doi.org/10.26732/j.st.2021.4.04)
2. Беляев А.С., Филипас А.А., Цавнин А.В., Тырышкин А.В. Методика расчёта системы обезвешивания крупногабаритных трансформируемых элементов

космических аппаратов при наземных испытаниях // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. № 1. С. 106-120. DOI: [10.31772/2712-8970-2021-22-1-106-120](https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-1-106-120)

3. Беляев А.С., Филипас А.А., Курганов В.В., Поберезкин Н.И. Четырехросовая система обезвешивания с управлением по вектору силы // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18, № 2. С. 98-106. DOI: [10.17122/1999-5458-2022-18-2-98-106](https://doi.org/10.17122/1999-5458-2022-18-2-98-106)

4. Гайдукова А.О., Белянин Н.А. Обзор систем обезвешивания // Решетневские чтения. 2016. Т. 1, С. 93-95.

5. Schulte Wethof B., Maas. J. Design of an Electromagnetic Linear Drive with Permanent Magnetic Weight Compensation // Actuators. 2024. V. 13, No. 3. P. 107. DOI: [10.3390/act13030107](https://doi.org/10.3390/act13030107)

6. Janssen J.L.G., Paulides J.J.H., Lomonova E.A., Delinchant B., Yonnet J.P. Design study on a magnetic gravity compensator with unequal magnet arrays // Mechatronics. 2013. V. 23, P. 197–203. DOI: [10.1016/j.mechatronics.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.08.003)

7. Pechhacker A., Wertjanz D., Csencsics E., Schitter G. Integrated electromagnetic actuator with adaptable zero power gravity compensation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2024. V. 71, No. 5. P. 5055-5062. DOI: [10.1109/TIE.2023.3288176](https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3288176)

8. Лысенков Я.А., Иванов Н.Н. Построение имитационной модели соленоида с использованием среды MatLab Simulink // Вестник науки. 2023. Т. 4, № 5 (62). С. 806-814.

9. Усольцев А.А. Общая электротехника. – СПб.: ГУ ИТМО, 2009. - 301 с.

10. Rollin. J.Parker. Advances in Permanent Magnetism. By John Wiley & Sons, 1990. 352 p.

11. Лифанов В.А. Расчёт электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов. – Челябинск: Издательский центр ЮурГУ, 2010. - 164 с.
12. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н., и др. Постоянные магниты: справочник. – М.: Изд-во «Энергия», 1980. - 486 с.
13. Арнольд Р.Р. Расчёт и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. – М.: Изд-во «Энергия», 1969. - 94 с.
14. Brezak D., Kovač A., Firak M. Matlab/simulink simulation of low-pressure pem electrolyzer stack // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. V. 48, No. 16. P. 6158-6173. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.03.092](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.092)
15. Taha Z., Aydın K., Arafah D., Sughayyer M. Comparative simulation analysis of electric vehicle powertrains with different configurations using AVL cruise and MATLAB Simulink // New Energy Exploitation and Application. 2024. V. 3, No. 1. P. 171-184. DOI: [10.54963/nee.v3i1.276](https://doi.org/10.54963/nee.v3i1.276)
16. Naz F. Closed loop buck & boost converter mathematical modeling, analysis and simulation using MATLAB // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2021. V. 10, No. 4, P. 263-271. DOI: [10.35940/ijeat.D2525.0410421](https://doi.org/10.35940/ijeat.D2525.0410421)
17. Красинский А.Я., Ильина А.Н., Красинская Э.М., Рукавишникова А.С. Математическое и компьютерное моделирование продольной динамики планетохода с упругой подвеской // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84612>
18. Гавва Л.М. Параметрический анализ в операционной среде MATLAB напряжённно-деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов с учётом технологии изготовления // Труды МАИ. 2017.

№ 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80504>

19. Фадин Д.А. Использование среды MATLAB-Simulink для реализации вычислительных алгоритмов в целочисленных микропроцессорных системах //

Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57021>

20. Абдали Лаит Мохаммед Абдали, Аль-Малики Муатаз Наджим Кассим, Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Морозова Н.В. Математическое моделирование с использованием алгоритма контроля точки максимальной мощности для фотоэлектрической системы // Труды МАИ. 2023. № 130. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=174619>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-20)

21. Максимов В.Н., Маринин Д.А., Максимов П.Н., Назарько А.В. Разработка линейного подшипника оборудования для модальных испытаний низкочастотных слабо демпфированных конструкций космических аппаратов // Динамика и виброакустика. 2024. Т. 10, № 2. С. 59–69. DOI: [10.18287/2409-4579-2024-10-2-59-69](https://doi.org/10.18287/2409-4579-2024-10-2-59-69)

Development of linear bearing equipment for modal testing of low-frequency weakly damped spacecraft structures

References

1. Ivanov A.V., Zommer S.A. Analysis of the umbrella-type reflector opening process on a stand with an active gravity compensation system. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*. 2021. V. 5, No. 4 (38). P. 208-216. (In Russ.). DOI: [10.26732/j.st.2021.4.04](https://doi.org/10.26732/j.st.2021.4.04)

2. Belyaev A.S., Filipas A.A., Tsavnin A.V., Tyryshkin A.V. Methodology for calculating the de-weighting system of large-sized transformable elements of space vehicles for ground tests. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal*. 2021. No. 1. P. 106-120. (In Russ.).

DOI: [10.31772/2712-8970-2021-22-1-106-120](https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-1-106-120)

3. Belyaev A.S., Filipas A.A., Kurganov V.V., Poberezkin N.I. Four-rope suspension system with force vector control. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*. 2022. V. 18, No. 2. P. 98-106. (In Russ.). DOI: [10.17122/1999-5458-2022-18-2-98-106](https://doi.org/10.17122/1999-5458-2022-18-2-98-106)
4. Gaidukova A.O., Belyanin N.A. Overviewing offloading (zero-g) system. *Reshetnevskie chteniya*. 2016. V. 1, P. 93-95. (In Russ.)
5. Schulte Wethof B., Maas J. Design of an Electromagnetic Linear Drive with Permanent Magnetic Weight Compensation. *Actuators*. 2024. V. 13, No. 3. P. 107. DOI: [10.3390/act13030107](https://doi.org/10.3390/act13030107)
6. Janssen J.L.G., Paulides J.J.H., Lomonova E.A., Delinchant B., Yonnet J.P. Design study on a magnetic gravity compensator with unequal magnet arrays. *Mechatronics*. 2013. V. 23, P. 197–203. DOI: [10.1016/j.mechatronics.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.08.003)
7. Pechhacker A., Wertjanz D., Csencsics E., Schitter G. Integrated electromagnetic actuator with adaptable zero power gravity compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2024. V. 71, No. 5. P. 5055-5062. DOI: [10.1109/TIE.2023.3288176](https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3288176)
8. Lysenkov Ya.A., Ivanov N.N. Building a simulation model of a solenoid using the MatLab Simulink environment. *Vestnik nauki*. 2023. V. 4, No. 5 (62). P. 806-814. (In Russ.)
9. Usol'tsev A.A. *Obshchaya elektrotehnika* (General electrical engineering). Saint Petersburg: GU ITMO Publ., 2009. 301 p.
10. Rollin J.Parker. *Advances in Permanent Magnetism*. By John Wiley & Sons, 1990. 352 p.

11. Lifanov V.A. *Raschet elektricheskikh mashin maloi moshchnosti s vozbuзhdeniem ot postoyannykh magnitov* (Calculation of low-power electric machines with excitation from permanent magnets). Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU Publ., 2010. 164 p.
12. Al'tman A.B., Vernikovskii E.E., Gerberg A.N., ets. *Postoyannye magnity: spravochnik* (Permanent magnets: handbook). Moscow: Izd-vo «Energiya» Publ., 1980. 486 p.
13. Arnol'd R.R. *Raschet i proektirovanie magnitnykh sistem s postoyannymi magnitami* (Calculation and design of magnetic systems with permanent magnets). Moscow: Izd-vo «Energiya» Publ., 1969. 94 p.
14. Brezak D., Kovač A., Firak M. Matlab/simulink simulation of low-pressure pem electrolyzer stack. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. V. 48, No. 16. P. 6158-6173. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2022.03.092](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.092)
15. Taha Z., Aydın K., Arafah D., Sughayyer M. Comparative simulation analysis of electric vehicle powertrains with different configurations using AVL cruise and MATLAB Simulink. *New Energy Exploitation and Application*. 2024. V. 3, No. 1. P. 171-184. DOI: [10.54963/neea.v3i1.276](https://doi.org/10.54963/neea.v3i1.276)
16. Naz F. Closed loop buck & boost converter mathematical modeling, analysis and simulation using MATLAB. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2021. V. 10, No. 4, P. 263-271. DOI: [10.35940/ijeat.D2525.0410421](https://doi.org/10.35940/ijeat.D2525.0410421)
17. Krasinskii A.Ya., Il'ina A.N., Krasinskaya E.M., Rukavishnikova A.S. Mathematical and computer modeling of rover with elastic suspension longitudinal dynamics. *Trudy MAI*. 2017. No. 95. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84612>

18. Gavva L.M. Strain-stress parametric analysis of structurally anisotropic panels of composite materials with account for manufacturing technology in MALAB. 2017. No. 93. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80504>
19. Fadin D.A. Realizing computational algorithms on integer microprocessor systems using MATLAB Simulink. *Trudy MAI*. 2015. No. 80. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57021>
20. Abdali Lait Mokhammed Abdali, Al'-Maliki Muataz Nadzhim Kassim, Kuvshinov V.V., Kuznetsov P.N., Morozova N.V. Mathematical technique modeling using the algorithm for control of the maximum power point for a photoelectric system. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174619>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-20](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-20)
21. Maksimov V.N., Marinin D.A., Maksimov P.N., Nazar'ko A.V. Development of linear bearing equipment for modal testing of low-frequency weakly damped spacecraft structures. *Dinamika i vibroakustika*. 2024. V. 10, No. 2. P. 59 – 69. (In Russ.). DOI: [10.18287/2409-4579-2024-10-2-59-69](https://doi.org/10.18287/2409-4579-2024-10-2-59-69)

Статья поступила в редакцию 18.11.2024

Одобрена после рецензирования 29.01.2025

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 18.11.2024; approved after reviewing on 29.01.2025; accepted for publication on 25.02.2025