Научная статья

УДК 621.313.333: 621.867.2 DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-21-29

Туманов Исакул Елегенович

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

* для корреспонденции: isa.tumani56@mail.ru

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КАЧЕСТВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Аннотация.



Информация о статье Поступила: 07 марта 2025 г.

Одобрена после рецензирования: 30 апреля 2025 г.

Принята к печати: 20 июня 2025 г.

Опубликована: 05 июня 2025 г.

Ключевые слова:

Электромагнитный возбудитель низкочастотных колебаний, мультифизика, вибродвигатель, виброгенератор, преобразователь Представлен электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний (ЭМВ НЧК) с последовательно включенным конденсатором в рабочих его режимах. Целью исследования является практическая реализация генераторного режима функционирования и его использование в качестве преобразователя возобновляемых источников энергии природного происхождения. Для достижения цели выполнено мультифизическое моделирование структурных элементов и составных частей объекта исследования, которые были определены на основании патентно-лицензионного поиска прототипа. В конструктивной схеме был введен индуктор в виде поляризованного реле, между полюсами которого якорь, закрепленный на шарнире, совершает низкочастотные колебательные движения. Также рассмотрена схема преобразователя, в котором якорь совершает возвратно-поступательные движения во внутренней полости цилиндрической катушки индуктивности, в иепь которой также последовательно включается конденсатор. Для преобразования частоты напряжения питания (50 Ги) на входе в низкочастотный диапазон механических колебаний осуществляется настройка параметров резонансного контура. Для практической реализации генераторного режима возбудителя колебаний рассмотрены технические решения преобразования механических вращательных движений природного происхождения в возвратно-поступательное (колебательное). Представлены результаты модельных исследований каждого структурного элемента в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS: анимации имитационных механических движений природного происхождения как входной сигнал механической подсистемы и осциллограмма резонанса индуцированного электрического тока в последовательном резонансном контуре электрической цепи переменного тока на выходе системы. Объект представлен в виде функциональной модели электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний как цепи последовательного преобразования механической энергии колебательного движения в электрическую.

Для цитирования: Туманов И.Е. Мультифизическое моделирование и разработка электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний в качестве преобразователя возобновляемых источников энергии // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3 (179). С. 21-29. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-21-29, EDN: LPZIOZ

Введение (Introduction)

Основоположником теории функционирования и создателем электромагнитных возбудителей низкочастотных колебаний (ЭМВ НЧК) является Нитусов Юрий Евгеньевич, в технической литературе они получили название «вибродвигатели серии типа МВТУ имени Н. Э. Баумана [1].

Методы (Methods)

Описание базовой модификации и принципа работы.





Puc. 3. Параметры настройки пользовательского интерфейса Fig. 3. Geometric model of the schematic scheme



Fig. 4. Image of magnetic flux density in the lower part of the magnet

В двигательном режиме функциональная модель ЭМВ НЧК представима как цепи последовательного преобразования электрической энергии питания в механическую работу.

ЭМВ НЧК так же, как большинство электрических машин, обладает свойством обратимости, т. е. может работать как в режиме вибрационного двигателя, так и в режиме генератора электрической энергии [2].

В генераторном режиме функциональная модель ЭМВ НЧК представима как цепь трех взаимосвязанных подсистем: механической, магнитной и электрической. Условием устойчивой работы в этой модели является сохранение энергии при соответствующих преобразованиях механической энергии в магнитную и далее в электрическую (Рис.1).

Целью исследования является практическая реализация функциональной модели генераторного режима функционирования ЭМВ НЧК. Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

• осуществить патентнолицензионный поиск на предмет определения прототипа ЭМВ НЧК для генера







торного режима функционирования по принципу действия и выбрать рациональные конструктивные варианты его исполнения на их основе [11-13];

выполнить мультифизическое моделирование вибрационного генератора переменного тока и конструктивных технических решений, обеспечивающих практическую реализацию идеи создания и разработки преобразователя механической энергии природного происхождения в электрическую энергию [14-18].

Результаты исследования (Results)

Для решения поставленной задачи рассмотрены три модели.

1. Мультифизическая модель вибрационного генератора переменного тока с одноконтурным силовым модулем.

В классических модификациях ЭМВ НЧК [10] в основном рассматривался двигательный режим функционирования (Рис. 1), при этом, если на выходе просто задавать низкочастотные механические колебания, то на входе не будет индуцироваться электродвижущая сила, так как в цепи нет индуктора. Поэтому в ЭМВ НЧК необходимо вносить конструктивный элемент в качестве индуктора [2].

В соответствии с законом электромагнитной индукции, если совершать возвратнопоступательные движения постоянного магнита внутри замкнутого контура, то в нем возникнет электрический ток (Опыт Фарадея) [3].

В качества конструктора модели используем «Comsol Multiphysics» – программное обеспечение для моделирования и симуляции многих физических процессов в инженерии, науке и промышленности [4].

Осуществим мультифизичемоделирование закона ское электромагнитной индукции, добавив в замкнутый контур конденсатор, включенный последовательно с индуктивностью катушки электромагнита [5].

Шаг 1: Настройка пользовательского интерфейса

Для упрощения задачи моделирования в пользовательском интерфейсе Model Wizard выбираем 2D Axisymmetric моделирование

AC/DC>Electromagnetic

Fields>Magnetic Fields (mf) и в Study выбираем Stationary, ста-

ционарный анализ только магнитных полей (определяет поля, вызванные магнитом в его начальном положении) (Рис.2).

Шаг 2: Геометрическая компоновка принципиальной схемы

В схеме магнит силой 1 Тл перемещается синусоидально с частотой 4 Гц с максимальным смещением на 30 мм внутри катушки на 800 витков. Это приводит к двумерной осесимметричной задаче, где пространство моделирования представляет собой прямоугольную область в плоскости rz, ограниченную граничным условием магнитной изоляции, которая представляет собой металлическую оболочку.

В приведенном примере моделируется движение магнита во внутренней полости катушки и вычисляются индуцированные напряжения. Смещение магнита является значительным, поэтому в приложении используется подвижная сетка. Сначала стационарный анализ только магнитных полей вычисляет поля, вызванные магнитом в его начальном положении. Это необходимо для предоставления корректных начальных условий для последующего переходного анализа магнитных полей и движущейся сетки. Допуски немного ужесточаются по сравнению со значениями по умолчанию (Рис.3).

Шаг 3: Определение плотности магнитного потока и деформации конечно-элементной сетки в нижней части магнита.

При визуализации видно, что магнитное поле и сетка взаимодействуют через 0,2 с, что немного



Рис. 8. Принципиальная схема вибрационного генератора переменного тока на базе электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний





Fig. 9. Configuration of the user interface of the simulation object

меньше периода колебаний магнита, T = 0,25 с. Сетка растягивается и сжимается в воздушных областях над и под магнитом. При этом сетка неконгруэнтная на границе идентичной пары, но граничное условие непрерывности пары гарантирует, что решение является непрерывным (Рис.4).

Шаг 4: Построение и генерация конечноэлементной сетки.

Когда движение области значительно, оправдано использование функционала скользящей сетки, что вводит дополнительные шаги в настройку. При построении геометрии должен использоваться функционал сборки формы для завершения геометрии. Эта функция предполагает, что все объекты не пересекаются, и автоматически создает пару иден-

тификации на границах между объектами. Пара идентификации используется для определения граничного условия непрерывности пары в интерфейсе магнитных полей, что указывает, что поля должны быть непрерывными по неподходящим сеткам. Для повышения точности приложение использует слабые ограничения и меньший размер сетки на этих границах (Рис.5).

Шаг 5: Анимация перемещения постоянного магнита.

Как магнит, так и многовитковые катушки представлены прямоугольниками. Углы магнита и катушки не закруглены, что приводит к упрощению сетки и уменьшению размера задачи. Хотя острые углы действительно вносят локальные особенности в магнитные поля, это не является проблемой для данного типа приложений, единственной целью которых является определение индуцированного напряжения на катушке (Рис.6).

Шаг 6: Визуализация индуцируемого напряжения в катушке с течением времени (Рис.7).

Рассмотренная модель была взята в качестве прототипа в процессе выполения патентнолицензионного поиска по инновационному патенту [11], на основе которого построена следующая мультифизическая модель.

2. Мультифизическая модель вибрационного генератора переменного тока на базе ЭМВ НЧК, работающего по аналогии с поляризованным реле (Рис.8).

Вибрационный генератор переменного тока содержит магнитопровод (1), замкнутый на полюса постоянного магнита (2), через якорь (3) подвижного механизма поляризованного реле (4), по обоим сторонам которого установлены рабочие обмотки (5) и (6) с последовательно им включенными конденсаторами (7) и (8). На магнитопроводе (1) выполнен поперечный зазор (9). Подвижной механизм (4) якоря (3) выполнен посредством шарнира [5-6].

Шаг 1. Настройка пользовательского интерфейса (Рис. 9).

Для своих исследований и упрощения задачи моделирования в пользовательском интерфейсе Model Wizard выбрали 2D моделирование> Magnetic Fields (mf) и в Study выбрали Time Dependent для наблюдений с изменением во времени.

Шаг 2: Построение геометрической модели.

В библиотеке материалов осуществляем подбор и определение геометрических параметров модели (Рис. 10).





Form Union (fin)



Шаг 3: Определение физических свойств материалов.

Определение и задание физических свойств материалов осуществляется в процессе настройки физического интерфейса (Рис. 11).

Шаг 4 : Задание свойств материалов.

После определения геометрии выбираем режим моделирования и задаем в полях редактирования свойства материалов и ограничения (Рис. 12).

Шаг 5: Выбор параметров конечноэлементной сетки.

Одним из заключительных действий станет добавление на объект сетки. Для этого в разделе "сетка" (Mesh) (Рис. 13) выберем, насколько маленькими должны быть фрагменты, на которые COMSOL разобьет нашу область. Чем меньше один фрагмент, там плотнее будет расположена сетка, и тем

> точнее будут полученные вычисления. Однако увеличение точности повлечет за собой увеличение вычислительной сложности, а значит остается выбрать наиболее подходящий вариант. Выберем "очень гладко" (Extra fine) и нажмем Build All.

> Шаг 6: Использование опции Moving Mesh (движущаяся сетка).

> Moving Mesh (движущаяся сетка) в COMSOL Multiphysics - это функционал, который позволяет изменять форму и размер сетки в процессе численного решения задачи. Это особенно полезно в тех случаях, когда исследуется задача с динамически изменяющимся геометрическими или физическими параметрами, такими как деформация материала, движение тела или изменение формы (Рис. 14).

> Moving Mesh (Рис.14) используется для автоматического адаптивного решения задачи, когда форма сетки изменяется в соответствии с изменением решения или условиями задачи. Это позволяет улучшить точность численного решения, особенно в случаях, когда происходят крупные деформации или перемещения объектов.

Шаг 7: Постобработка и визуализация результатов моделирования.

-			
	Material	Selection	
	Air (mat14)	Domains 1, 6, 8, 11	
	Copper (mat15)	Domains 2, 4, 7, 13–15	
	BMHFa-23/22 K (mat16)	Domain 9	
	Casting Cast Iron, Nodular (mat17)	Domains 3, 5, 10, 12	
	A sting Case from, Noturial (mat17) A materials A materials Basic (def) Refractive ind Nonlinear mo Ideal gas (ideal Copper (mat15) Basic (def) Voung's modu Hearing Case (def) Nonlinear mo Basic (def) Basic (def) Basic (def) Beht curve (Bl Basic (def) Remanent flux Basic (def) Remanent flux Basic (def) Remanent flux Basic (def) Basic (def) Remanent flux Basic (def) Basic (def)	ex (rfi) ex (rfi) alGas) ulus and Poisson's ratio (Enu) istivity (ltr) HCurve) imat16) x density (Br) ulus and Poisson's ratio (Enu) BHSCurve) Nodular (mat17) HCurve) ulus and Poisson's ratio (Enu) BOÜCMB MAMEPUAJOB atterial properties ed 1 stribution 1 riangular 1 ze 1 pution 1	
	 Sequence Type 		
	Physics-controlled meth		
	Filysics-controlled mesh		
	Physics-Controlled Mesh		
	Physics-Controlled Mesh Element size:		
	Physics-Controlled Mesh Element size: Coarse		
	Physics-Controlled Mesh Element size: Coarse Contributor		Use
	Physics-Controlled Mesh Element size: Coarse Contributor Magnetic Fields (mf)		Use
	Physics-Controlled Mesh Element size: Coarse Contributor Magnetic Fields (mf) Electrical Circuit (cir)		Use
	 Physics-Controlled Mesh Element size: Coarse Contributor Magnetic Fields (mf) Electrical Circuit (cir) Rotating Machinery, Magnetic (rmm) 		

Puc. 13. Сгенерированная конечно-элементная сетка Fig. 13. Generated finite element grid

Для визуализации магнитных полей были использованы градиент и контурные линии, показывающие направление и силу магнитных полей, и была добавлена «легенда градиента» [8-10]. (Рис. 15). Теперь, когда у нас заданы практически все условия, заходим в раздел "изучение" (Study), (Step 1: Frequency Domain), задаем частоту колебаний и нажав "построить" (Plot) получаем возможность визуализации колебательных движений якоря (Puc. 15).

Таким образом, если на вход электромеханической системы (Рис. 8) подать механические колебательные движения, то на выходе получим электрический сигнал.

Обмотки последовательного включения, работающие при заданном токе, выполняются с малым числом витков большого сечения. Ток, проходящий по такой обмотке, практически не зависит от ее параметров, а определяется характеристиками элементов, включенных последовательно с этой обмоткой, в нашем случае это конденсатор.

В рассмотренных двух вариантах вибрационных генераторов электрической энергии на базе электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний на вход должно подаваться возвратно-поступательное (колебательное) движение. В процессах явлений природного характера чаще всего имеют место медленные поступательные или низкооборотные вращательные движения. Поэтому для практической реализации обратимого режима

функционирования ЭМВ НЧК в качестве генератора целесообразно рассмотреть наиболее рациональные решения устройств по преобразованию этих движений в возвратнопоступательное (колебательное) движение рабочего органа.

На следующем этапе было выполнено мультифизическое моделирование преобразователя вращательного движения в возвратно-поступательное (колебательное) на примере кривошипноползунного механизма.

Алгоритм моделирования аналогичен двум вышеописанным моделям. Поэтому представляем визуальный результат постобработки визуализации результата моделирования (Рис.16).

Актуальность рассмотренных задач и методы моделирования под-

тверждены инновационными патентами РК [3,4] и Свидетельствами государственной регистрации инновационных программ для ЭВМ РосПатента РФ [12,13,14,15].

Выводы (Conclusion)

Deform	 Deforming Domain I Symmetry/Roller 1 Fixed Boundary 1 Rotating Boundary 1 Ing Domain Deforming Domain 1 		
Dom	nain Selection		
Selection	n: Manual		•
	1 8 10	÷	+
Ove	rride		
▼ Smo	othing		
Mesh sm	noothing type:		
Laplac	e		•
🔻 Initia	al Deformation		
Initial de	formation:	x	
dx 0		Y	m

Puc. 14. Генерация подвижной конечно-элементной сетки Fig. 14. Generation of a moving finite element grid





 ЭМВ НЧК в генераторном режиме функционирования реализуемо при добавлении в конструктивную схему индуктора в виде постоянного магнита;

• мультифизические модели составных частей ЭМВ НЧК подтверждают актуальность разработки вибрационных генераторов электрической энергии на его базе в качестве преобразователей возобновляемых природных источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманов И. Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы // Электротехника. 2013. № 8. С. 48–52. ISSN 0013-5860 (ж-л входит в базу Scopus, перев. на англ. яз. и изд. в пол. объеме в США в изд. «Allerton Press», INC, Нью-Йорк).

2. Туманов И. Е. Электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний. Вопросы теории, моделирования, разработки и прикладной значимости // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 1. С. 83–92. DOI: 10.46960/2658-6754 2021 1 83.

3. Туманов И. Е. Параметрический синтез механической характеристики электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний на основе методов аналитической геометрии и его мультифизическое моделирование // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2023. № 10.

4. Липай Б. Р., Маслов С. И. Компьютерные модели электромеханических систем: модели основных компонентов электромеханических систем. М.: Изд. дом МЭИ, 2022.

5. Туманов И. Е., Орынбаев С. А., Байбутанов Б. К., Исембергенов Н. Т. Вибрационный генератор переменного тока: инновационный патент РК № 29052. 15.10.2014. Бюл. № 10.

6. Туманов И. Е., Орынбаев С. А., Байбутанов Б. К. Вибрационный генератор электрической энергии: инновационный патент РК № 30480. 15.10.2015. Бюл. № 10.

7. Янкин С. Электротехнические расчеты в COMSOL Multiphysics® // Вебинар Московского представительства Multiphysics®. 2019.

8. Янкин С. Вибрационный анализ в COMSOL Multiphysics® // Вебинар Московского представительства Multiphysics®. 2019.

9. Янкин С. Сопряженные магнитные и механические расчеты в COMSOL Multiphysics® // Вебинар Московского представительства Multiphysics®. 2019.

----- 10. Sonnerlind H. Performing Random Vibration Analyses in COMSOL Multiphysics® // Webinar: Random Vibration. 2019.

11. Образовательный портал Томского политехнического университета [Электронный ресурс]. Томск, 2024. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/r/RASPOPOVANI/Teaching/

(дата обращения: 08.04.2025)

12. Туманов И. Е., Кенден К. В. Программа для построения, визуализации анализа физических процессов в преобразователе механических колебаний в электрический сигнал на выходе: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU 2025613484. 12.02.2025. Бюл. № 2.



Puc. 16. Мультифизическая модель преобразователя вращательного движения в колебательное Fig. 16. Multi-physical model of the converter from rotational motion to oscillatory

13. Туманов И. Е., Кенден К. В. Программа для построения, визуализации анализа физических процессов в последовательном резонансном контуре на входе электромеханической системы: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU 2025613576. 12.02.2025. Бюл. № 2.

14. Туманов И. Е., Кенден К. В. Программа для построения, визуализации анализа физических процессов в электромагнитном возбудителе низкочастотных колебаний в двигательном режиме функционирования: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ RU 2025613810. 17.02.2025. Бюл. № 2.

15. Туманов И. Е., Кенден К. В. Программа для построения, визуализации анализа физических процессов в электромагнитном возбудителе низкочастотных колебаний в генераторном режиме функционирования: пат. RU 2025615682 Рос. Федерация. 06.03.2025. Бюл. № 3.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Туманов Исакул Елегенович, доцент, КазНУ имени аль-Фараби, (050040, Казахстан, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 71, канд. техн. наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9874-5788, e-mail: isa.tumani56@mail.ru Заявленный вклад авторов:

Туманов Исакул Елегенович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-21-29

Isakul Ye. Tumanov

Al-Farabi Kazakh National University

* for correspondence: isa.tumani56@mail.ru

MULTIPHYSICAL MODELING AND DEVELOPMENT OF AN ELECTROMAGNETIC EXCITER OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS AS A CONVERTER OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract.



Article info Received: 07 March 2025 An electromagnetic exciter of low-frequency mechanical oscillations (EME LFO) with a series-connected capacitor in its operating modes is presented. The aim of the study is the practical implementation of the generator mode of operation and its use as a converter of renewable energy sources of natural origin. To achieve the goal, multiphysical modeling of structural elements and components of the object of study, which were determined on the basis of a patent and license search for a prototype, was performed. An inductor in the form of a polarized relay was introduced into the design scheme, between the poles of which an anchor, fixed on a hinge, performs low-frequency oscillatory movements. Also considered is a con-

Accepted for publication:

30 April 2025

Accepted: 20 June 2025

Published: 26 June 2025

Keywords: electromagnetic exciter of low-frequency oscillations, multiphysics, vibration motor, vibration generator, converter. verter circuit in which the anchor performs reciprocating movements in the internal cavity of a cylindrical inductance coil, in the circuit of which a capacitor is also series-connected. To convert the frequency of the supply voltage (50 Hz) at the input to the low-frequency range of mechanical oscillations, the parameters of the resonant circuit are adjusted. For practical implementation of the generator mode of the oscillation exciter, technical solutions for converting mechanical rotational motions of natural origin into reciprocating (oscillatory) motion are considered. The results of model studies of each structural element in the COMSOL MUL-TIPHYSICS software environment are presented: animations of simulating mechanical motions of natural origin as an input signal of the mechanical subsystem and an oscillogram of the resonance of the induced electric current in a series resonant circuit of an alternating current electric circuit at the output of the system. The object is presented as a functional model of an electromagnetic exciter of lowfrequency mechanical oscillations as a circuit for successively converting mechanical energy of oscillatory motion into electrical energy.

For citation: Tumanov I.Ye. Multiphysical modeling and development of an electromagnetic exciter of low-frequency oscillations as a converter of renewable energy sources. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 3(179):21-29 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-21-29, EDN: LPZIOZ

REFERENCES

1. Tumanov I.E. Parametric electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations for control, measurement, and mass dosing systems. *Elektrotekhnika*. 2013; 8:48–52. ISSN 0013-5860.

2. Tumanov I.E. Electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations: Issues of theory, modeling, development, and applied significance. *Intellektual'naya Elektrotekhnika.* 2021; 1: 83–92. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_83.

3. Tumanov I.E. Parametric synthesis of the mechanical characteristics of an electromagnetic exciter of lowfrequency vibrations based on analytical geometry methods and its multiphysics modeling. *Elektrooborudovanie: Ekspluatatsiya i Remont.* 2023; 10.

4. Lipai B.R. Maslov S.I. Computer models of electromechanical systems: Models of main components of electromechanical systems. Moscow: MEI Publishing House; 2022.

5. Tumanov I.E., Orynbaev S.A., Baibutanov B.K., Isembergenov N.T. Vibratory alternating current generator. Innovative Patent RK No. 29052, 15 October. 2014. Bulletin No. 10.

6. Tumanov I.E., Orynbaev S.A., Baibutanov, B.K. Vibratory electric energy generator. Innovative Patent RK No. 30480, 15 October. 2015. Bulletin No. 10.

7. Yankin S. Electrical engineering calculations in COMSOL Multiphysics[®]. Webinar: Moscow Representation of Multiphysics[®]. 2019.

8. Yankin S. Vibration analysis in COMSOL Multiphysics[®]. Webinar: Moscow Representation of Multiphysics[®]. 2019. 9. Yankin S. Coupled magnetic and mechanical calculations in COMSOL Multiphysics[®]. Webinar: Moscow Representation of Multiphysics[®]. 2019.

10. Sonnerlind H. Performing random vibration analyses in COMSOL Multiphysics[®]. Webinar: Random Vibration. 2019.

11. Educational Portal of Tomsk Polytechnic University. 2024. [Online]. Available at: https://portal.tpu.ru/SHARED/r/RASPOPOVANI/Teaching/ [Accessed 8 April 2025].

12. Tumanov I.E. Kenden K.V. Program for constructing, visualizing, and analyzing physical processes in a converter of mechanical vibrations into an electrical signal at the output. Certificate of state registration of software RU 2025613484, 12 February. 2025. Bulletin No. 2.

13. Tumanov I.E., Kenden K.V. Program for constructing, visualizing, and analyzing physical processes in a series resonant circuit at the input of an electromechanical system. Certificate of state registration of software RU 2025613576, 12 February. 2025. Bulletin No. 2.

14. Tumanov I.E., Kenden K.V. Program for constructing, visualizing, and analyzing physical processes in an electromagnetic exciter of low-frequency vibrations in motor operation mode. Certificate of state registration of software RU 2025613810, 17 February. 2025. Bulletin No. 2.

15. Tumanov, I.E. Kenden, K.V. Program for constructing, visualizing, and analyzing physical processes in an electromagnetic exciter of low-frequency vibrations in generator operation mode. Patent RU 2025615682 Russian Federation, 6 March. 2025. Bulletin No. 3.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Isakul Ye. Tumanov, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, (050040, Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue, Candidate of Technical Sciences, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9874-5788, e-mail: isa.tumani56@mail.ru

Contribution of the authors:

Isakul Ye. Tumanov – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, collection and analysis of data, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

Authors have read and approved the final manuscript.

