

Научная статья

УДК 537.868

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-13-24

Туманов Исакул Елегенович

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

* для корреспонденции: isa.tumani56@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВУХТАКТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗБУДИТЕЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ**Информация о статье**

Поступила:

13 февраля 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

01 марта 2025 г.

Принята к печати:

10 марта 2025 г.

Опубликована:

24 марта 2025 г.

Ключевые слова:*Электромагнитный возбудитель низкочастотных колебаний, вибродвигатель, двухтактный***Аннотация.**

Рассмотрен двухтактный электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний (ЭМВ НЧК) с двумя идентичными резонансными контурами, каждый из которых состоит из индуктивности и последовательно включается через свой конденсатор в цепь питания. Для преобразования частоты напряжения питания (50 Гц) на входе в низкочастотный диапазон механических колебаний осуществляется настройка параметров резонансных контуров. Представлены результаты модельных исследования объекта в среде COMSOL MULTIPHYSICS, полученные с учетом допущения обусловленной линейности пассивных элементов в резонансных контурах электрической цепи переменного тока. Получены анимации процессов биений входных высокочастотных сигналов и их плавной модуляции в низкочастотной области на выходе и анимация механических колебаний якоря. Осуществлен анализ результатов моделирования на предмет соответствия механической характеристике возбудителя колебаний с оптимальной формой активного параметра на выходе во взаимозависимости с активным параметром на входе электромеханической системы и представлена эволюция механической характеристики: овал – эллипс – окружность для всех его модификаций. Сформулированы основополагающие выводы и практические рекомендации по применению результатов модельных исследований электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний в двухтактном исполнении.

Для цитирования: Туманов И.Е. Построение и анализ мультифизической модели двухтактного электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 1 (177). С. 13-24. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-13-24, EDN: CPYQZA

Введение. Создателем электромагнитных возбудителей низкочастотных колебаний (ЭМВ НЧК) и основоположником теории функционирования является Нитусов Юрий Евгеньевич, и в технической литературе они имеют название «вибродвигатели серии типа МВТУ имени Н. Э. Баумана» [1]. Впервые схема такого преобразователя была предложена и описана им в журнале «Электричество», и направление исследований получило продолжение в его личных трудах и в трудах его учеников А. И. Коцюбинского, Б. И. Крюкова, З. А. Кулиева, Н. М. Полякова, И. С. Бабаева, Р. А. Гасымова, Ф. А. Габараева и др. В работах перечисленных авторов был исследован принцип использования «резонанса напряжений» в качестве инструмента для преобразования высокочастотных составляющих активных параметров электрической подсистемы на входе

(напряжение питания, тока в цепи и магнитный поток) в низкочастотную составляющую активного параметра на выходе (тяговое усилие электромагнита) для всех типов и модификаций конструктивного исполнения ЭМВ НЧК: однофазный однотактный, однофазный двухтактный, однофазный с четырехсторонним воздействием на якорь электромагнита, трехфазный однотактный, трехфазный двухтактный и трехфазный с четырехсторонним воздействием на якорь электромагнита [2-8].

Описание конструктивной схемы и принципа работы двухтактного ЭМВ НЧК

В работах [9, 10, 11] представлены различные конструкции двухтактных ЭМВ НЧК.

Двухтактный электромагнитный вибратор содержит два идентичных колебательных контура, каждый из которых имеет стержневые магнитопро-

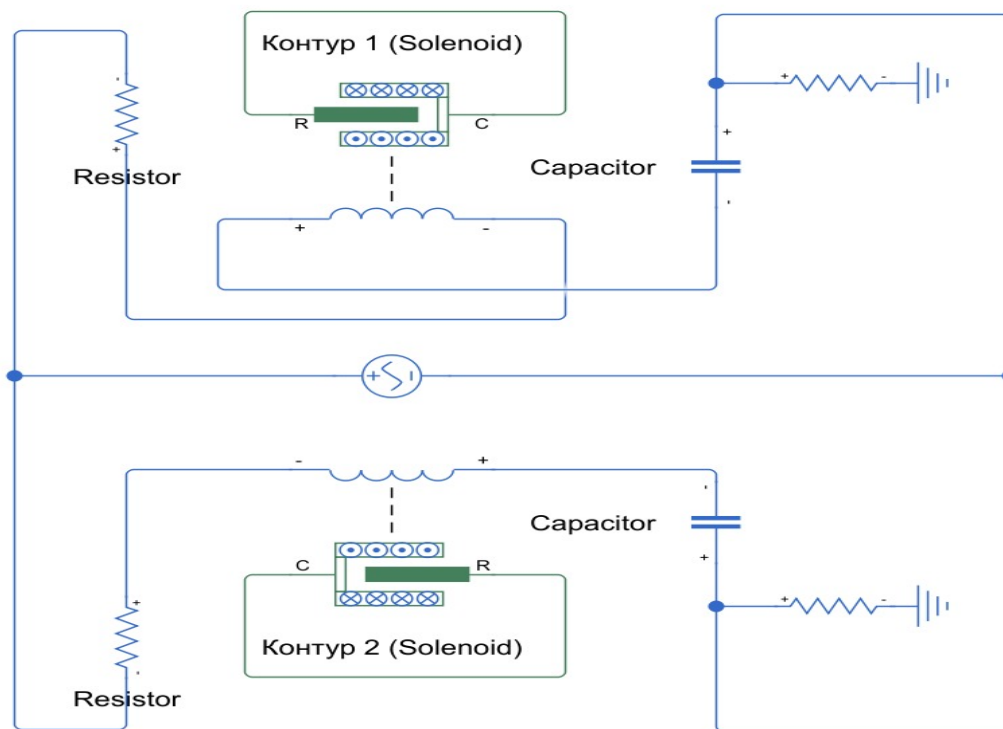


Рис. 1. Принципиальная схема однофазного двухтактного ЭМВ НЧК

Fig. 1. Schematic diagram of a single-phase, two-stroke electromagnetic exciter of low-frequency oscillations

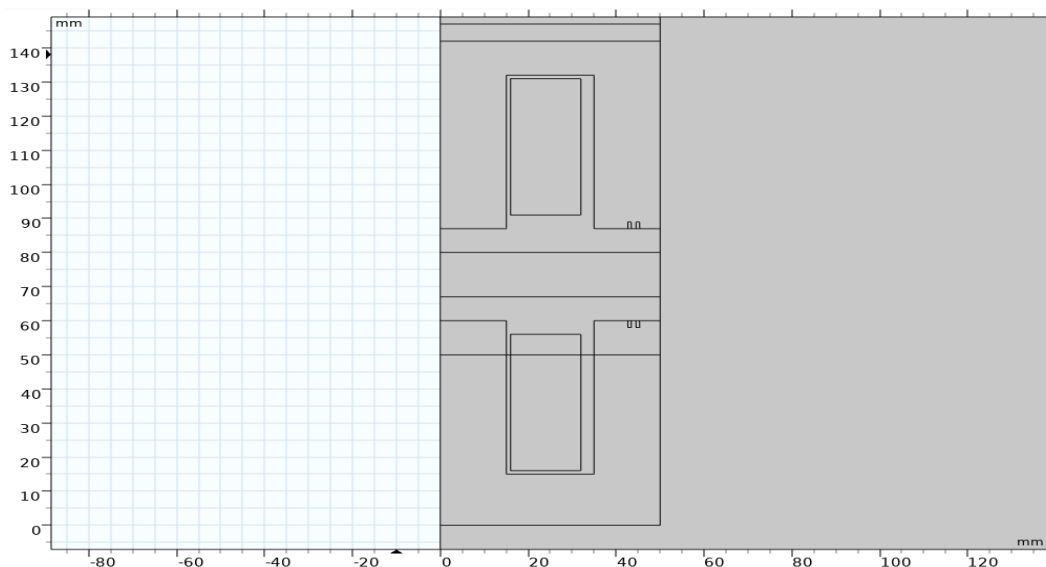


Рис. 2. Геометрическая модель двухтактного электромагнитного вибродвигателя, выполненная в программной среде Comsol Multiphysics

Fig. 2. Geometric model of a two-stroke electromagnetic vibration motor, created in the Comsol Multiphysics software environment

воды с обмотками, размещенные на стержнях магнитопроводов, ферромагнитный якорь, закрепленный на упругой системе, и конденсаторы, каждый из которых включен между соответствующей обмоткой и клеммой источника напряжения.

Принципиальная схема (Рис. 1) построена в соответствии с ее математической моделью электромагнитного вибратора с источником питания [7, 12-17].

Далее пошагово выполняем процесс моделирования:

Шаг 1: Геометрическую модель (Рис. 2) строим в соответствии с принципиальной схемой и с настройками пользовательского интерфейса в Comsol Multiphysics в формате 2D [18-24].

Геометрическая модель позволяет создавать и изменять форму объекта моделирования и предопределяет достоверность результатов исследования.

Шаг 2 (Рис. 3): Физический интерфейс включает выбор конструкционных материалов.

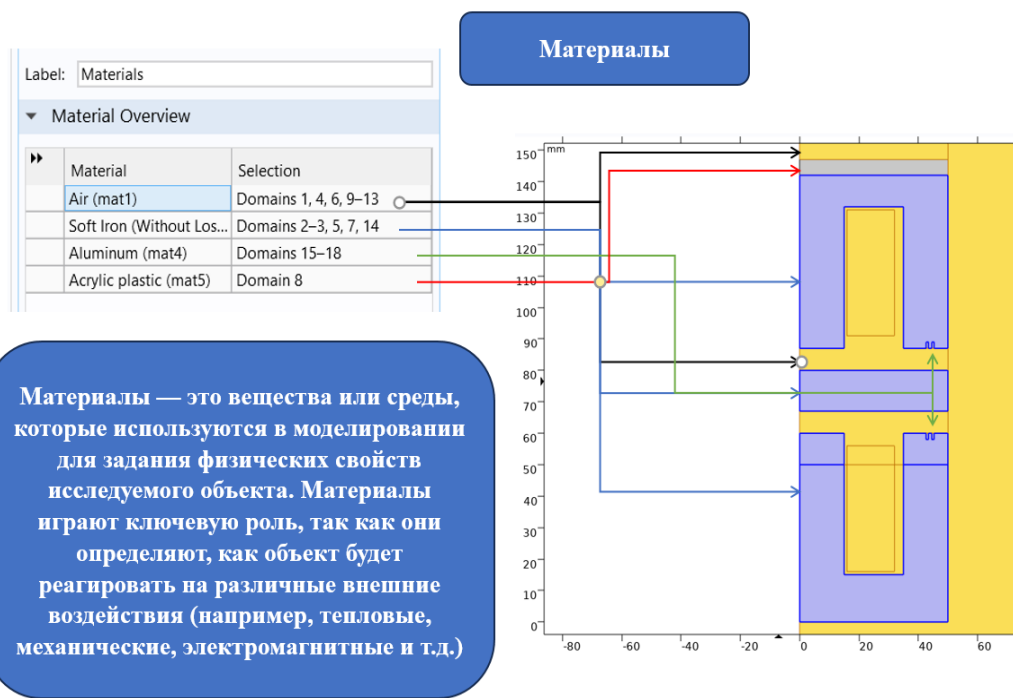


Рис. 3. Выбор конструкционных материалов
Fig. 3. Selection of construction materials

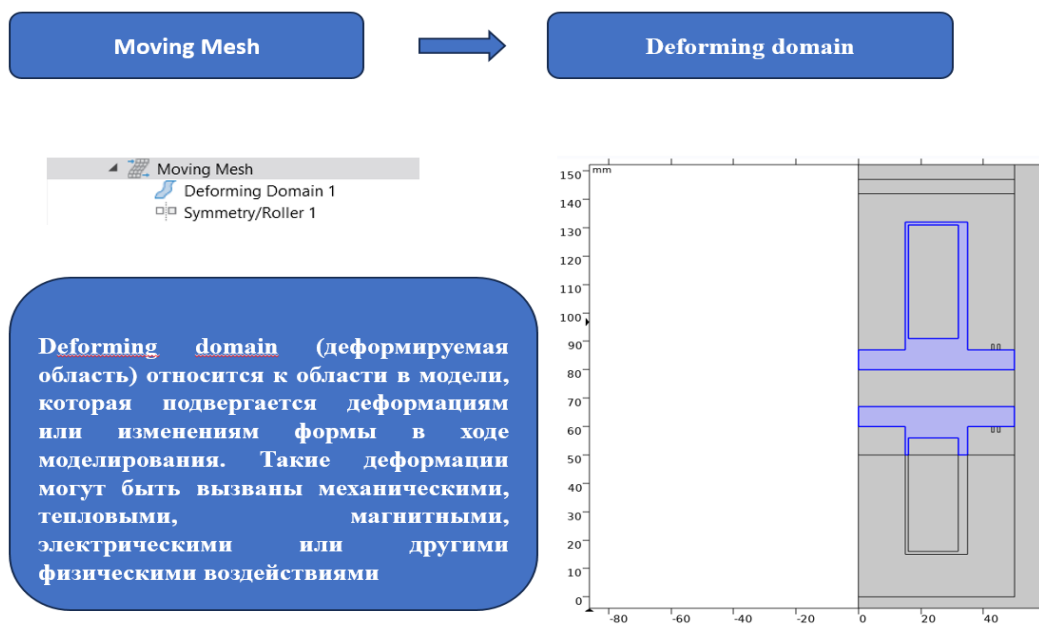


Рис. 4. Движущаяся (подвижная) сетка
Fig. 4. Moving (mobile) mesh

Шаг 3 (Рис. 4): Определение деформируемой области в процессе генерации конечно-элементной сетки:

В процессе работы над ошибками и их корректировками вводим опцию подвижной сетки (moving mesh).

Шаг 4: Определение деформируемой области конечно-элементной сетки (Рис. 5, 6).

Использование этой опции связано с необходимостью синхронизации параметров двух электромагнитов, поочередно воздействующих на один общий якорь так, чтобы в момент максимального

притягивающего усилия верхнего электромагнита якорь притягивался в сторону верхнего электромагнита (настройка резонанса напряжений в верхнем контуре и его расстройка в нижнем контуре) и отталкивался со стороны нижнего в первом такте, и наоборот, во втором такте на основании периодического и поочередного процесса появления и исчезновения резонанса напряжений в двух противоположных контурах якорь будет совершать возвратно-поступательные движения (низкочастотные механические колебания).

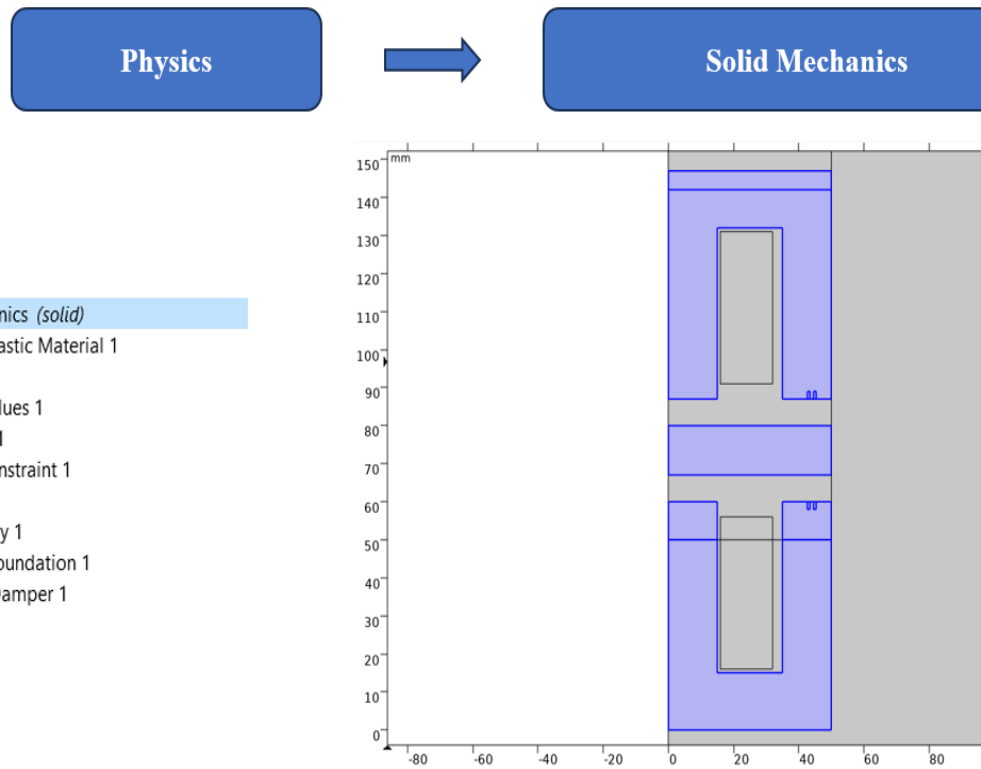


Рис. 5. Физический интерфейс модели
Fig. 5. Physical interface of the model

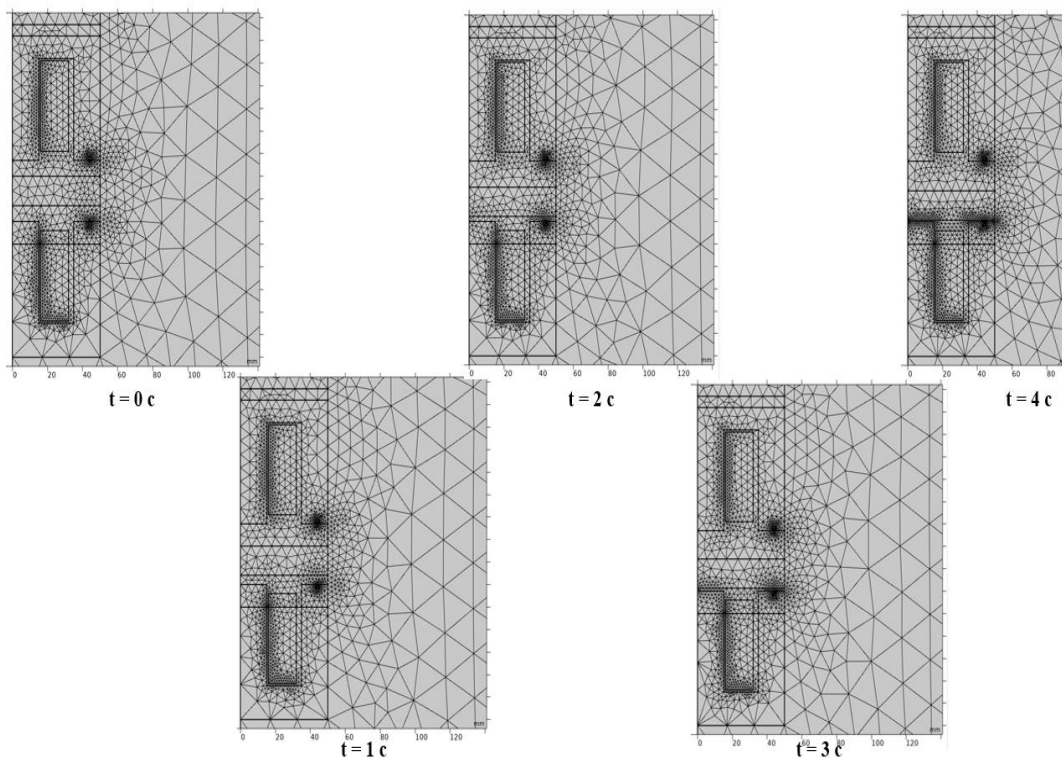


Рис. 6. Генерация сетки и динамика ее изменения во времени
Fig. 6. Mesh generation and the dynamics of its change over time

Шаг 5: Постобработка и визуализация результатов моделирования (Рис. 7–16).

Рассмотрим анимации осциллограмм процесса биений модуляции колебаний резонансного конту-

ра при разных значениях частоты, индуктивности катушки и емкости конденсатора.

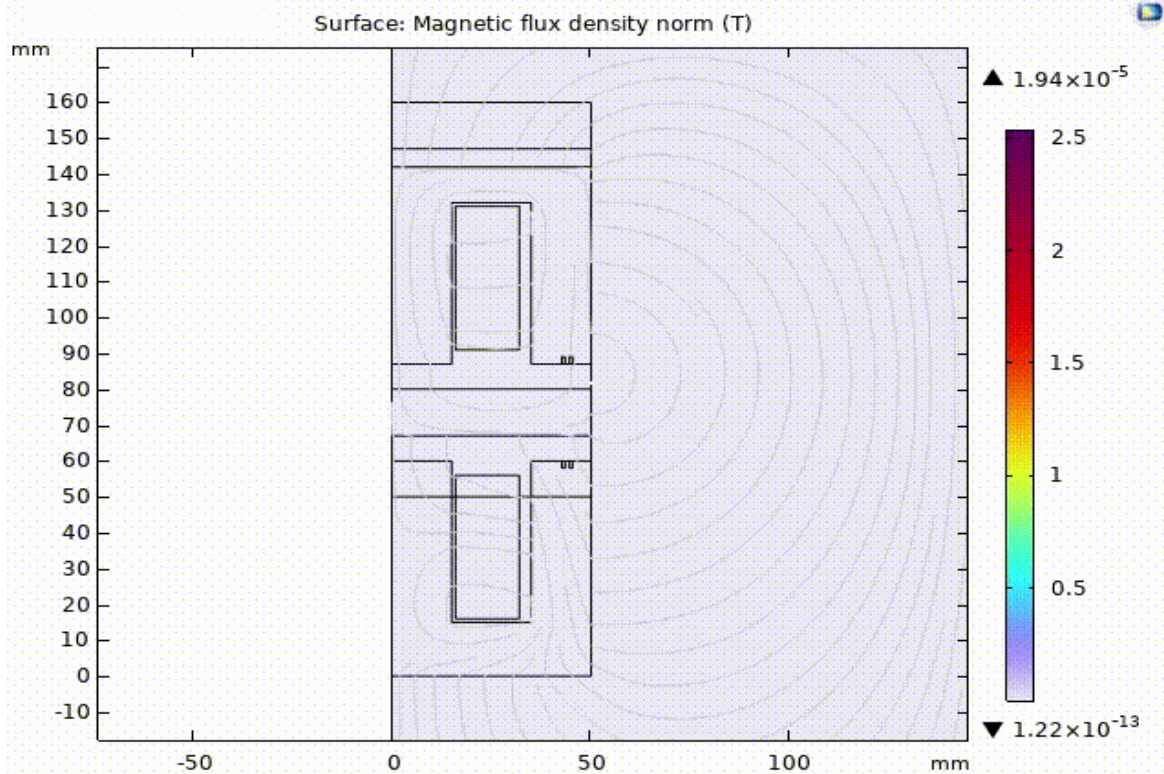


Рис. 7. Фрагмент анимации движения якоря (среднее начальное положение)
 Fig. 7. Fragment of the animation of the anchor movement (average initial position)

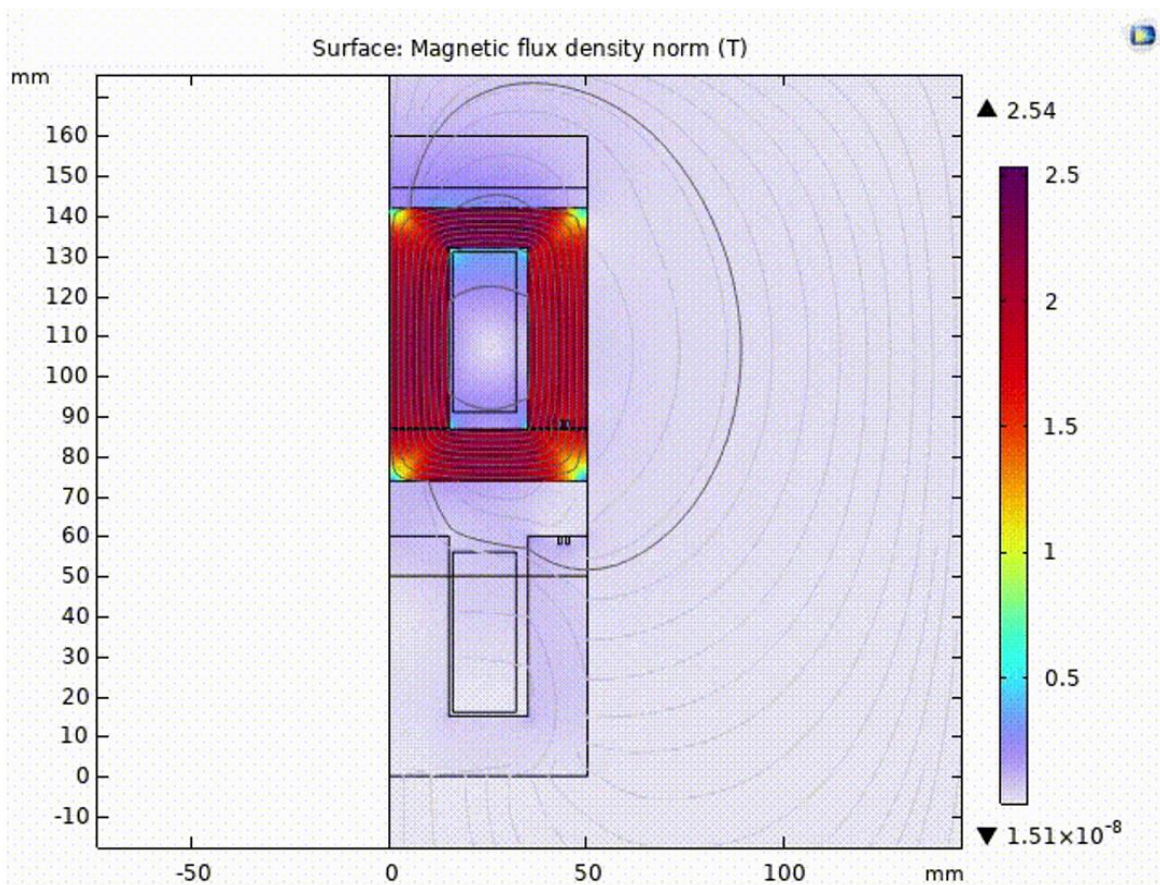


Рис. 8. Фрагмент анимации движения якоря (верхнее положение)
 Fig. 8. Animation fragment of the anchor movement (upper position)

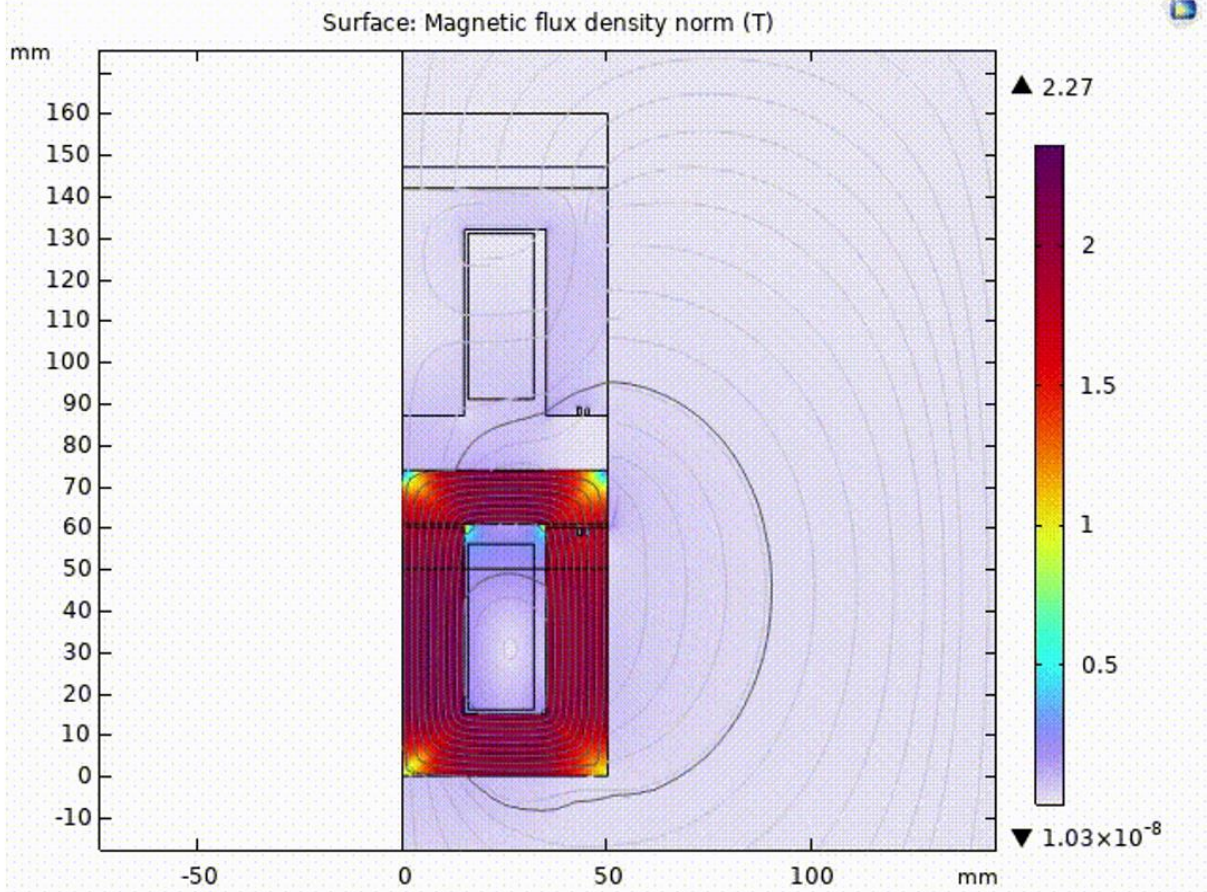


Рис. 9. Фрагмент анимации движения якоря (нижнее положение)
 Fig. 9. Animation fragment of the anchor movement (lower position)

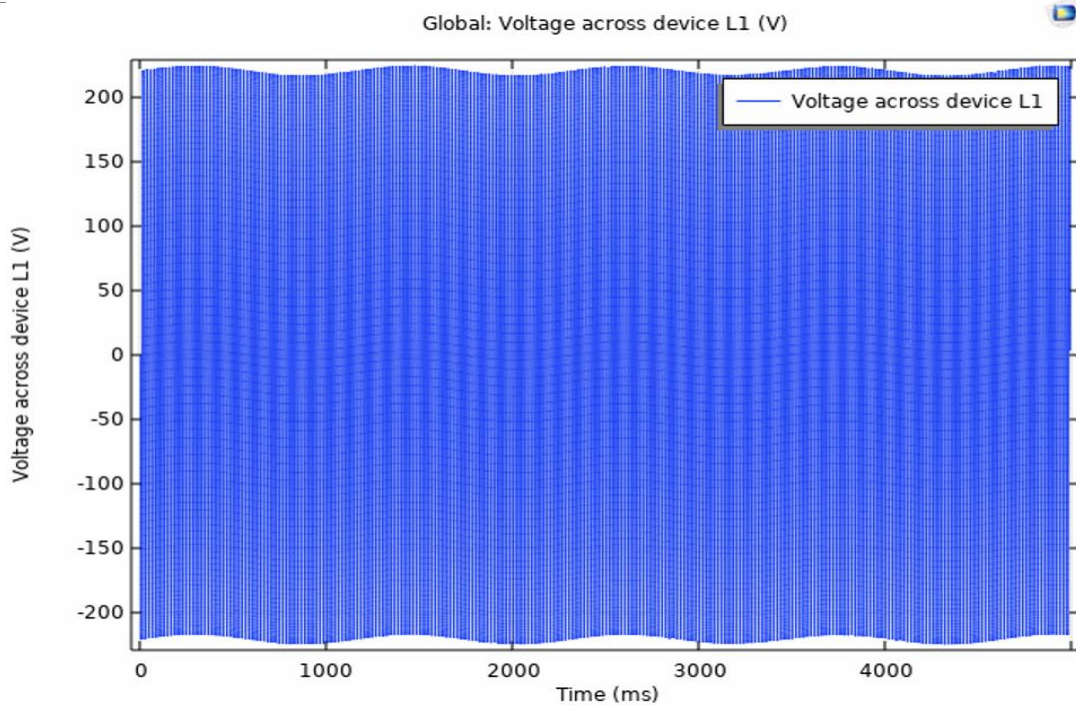


Рис. 10. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при : частоте 1 Гц, индуктивности 0,1 Генри, емкости конденсатора 340 мкФ

Fig. 10. Oscillogram of the process of beating and modulation of oscillations at: frequency of 1 Hz, inductance of 0.1 Henry, capacitor capacitance of 340 μF

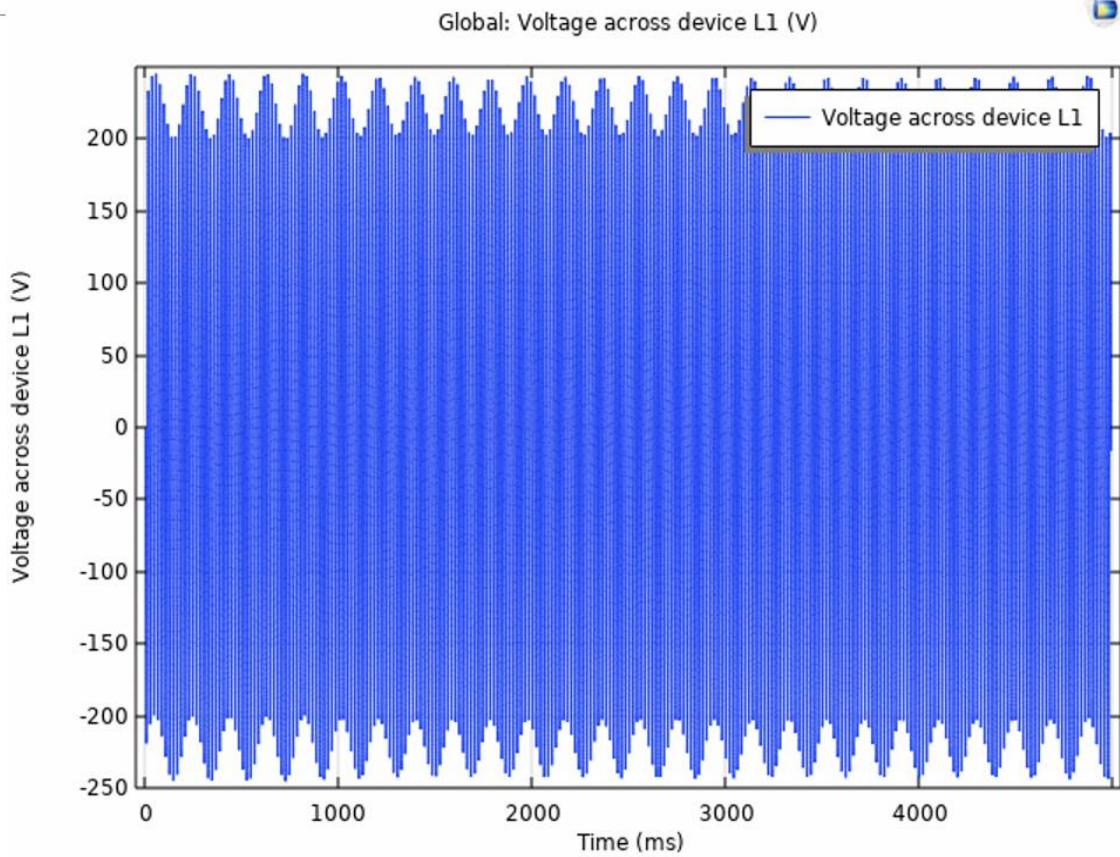


Рис. 11. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при : частоте 5 Гц, индуктивности 0,1 Генри, емкости конденсатора 9,5 мкФ
 Fig. 11. Oscillogram of the process of beating and modulation of oscillations at: frequency of 5 Hz, inductance of 0.1 Henry, capacitor capacitance of 9.5 μF

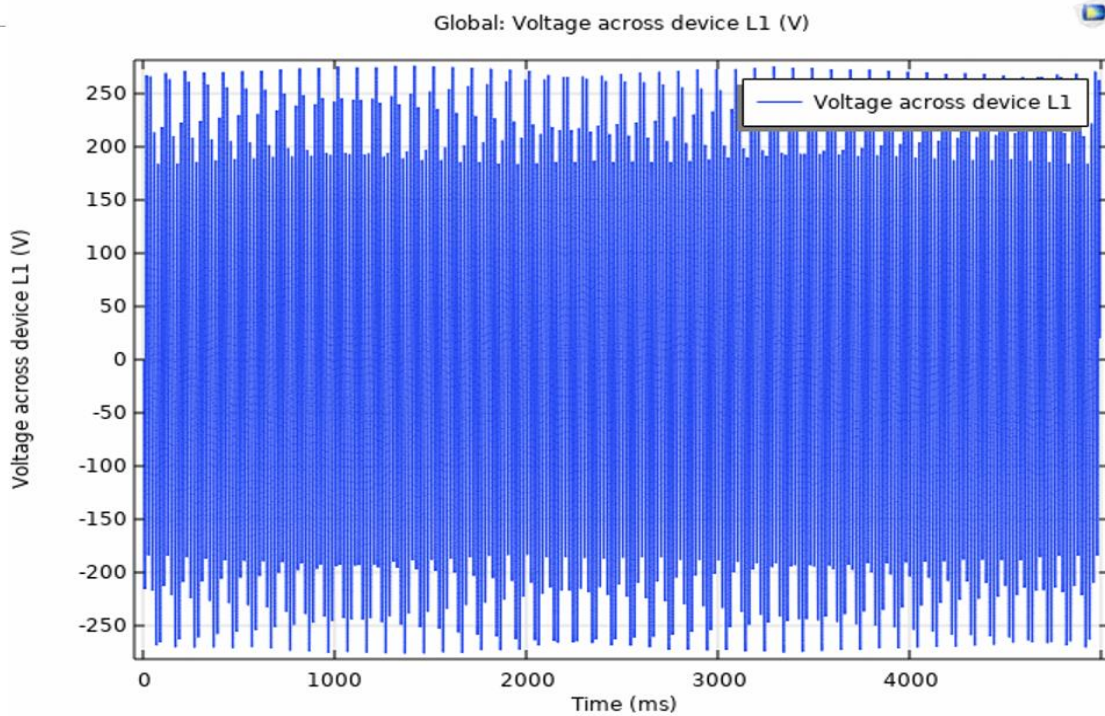


Рис. 12. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при : частоте 10 Гц, индуктивности 0,1 Генри, емкости конденсатора 2,5 мкФ
 Fig. 12. Oscillogram of the process of beating and modulation of oscillations at: frequency of 10 Hz, inductance of 0.1 Henry, capacitor capacitance of 2.5 μF

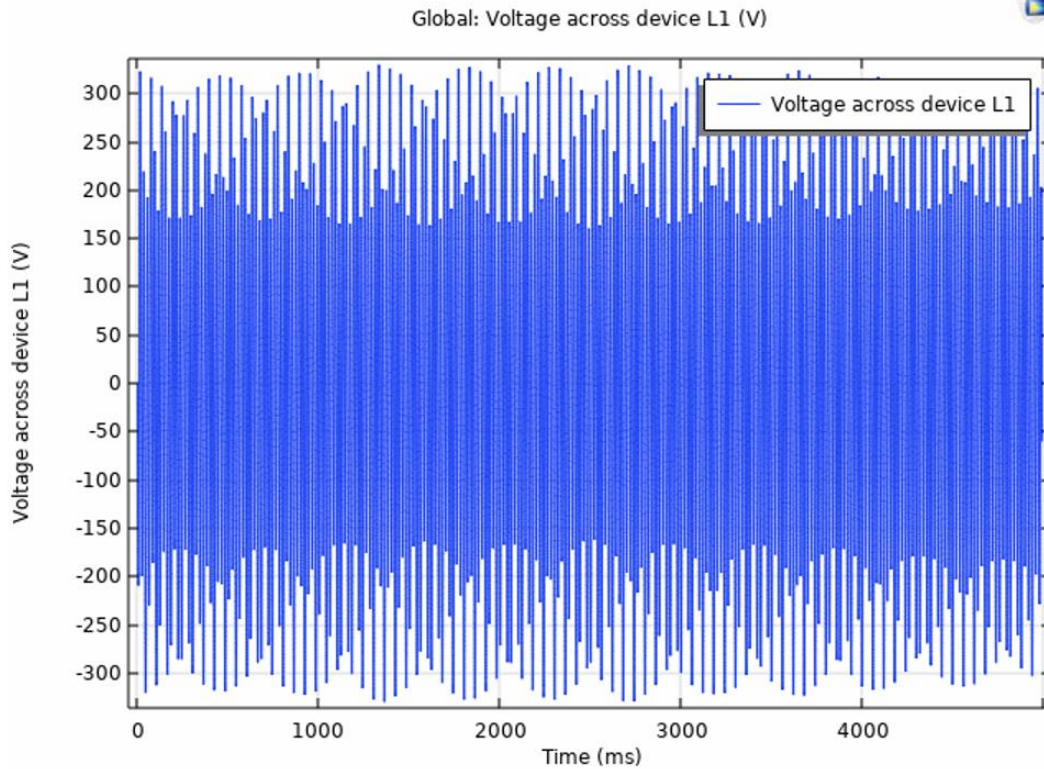


Рис. 13. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при: частоте 15 Гц, индуктивности 0,1 Генри, емкости конденсатора 1 мкФ

Fig. 13. Oscillogram of the process of beating and modulation of oscillations at: frequency of 15 Hz, inductance of 0.1 Henry, capacitor capacitance of 1 μ F

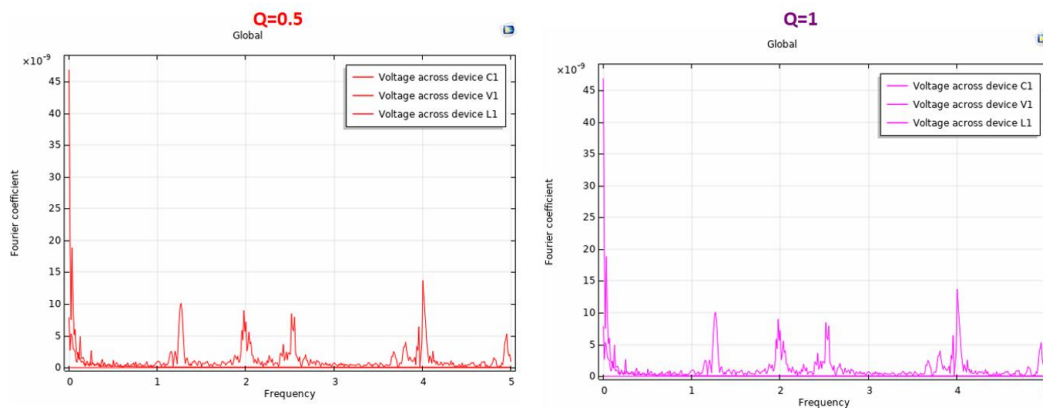


Рис. 14. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура $Q = 0, 5$ (слева) и $Q = 1$ (справа)

Fig. 14. Animations of resonance curves for the oscillatory circuit quality factor $Q = 0.5$ (left) and $Q = 1$ (right)

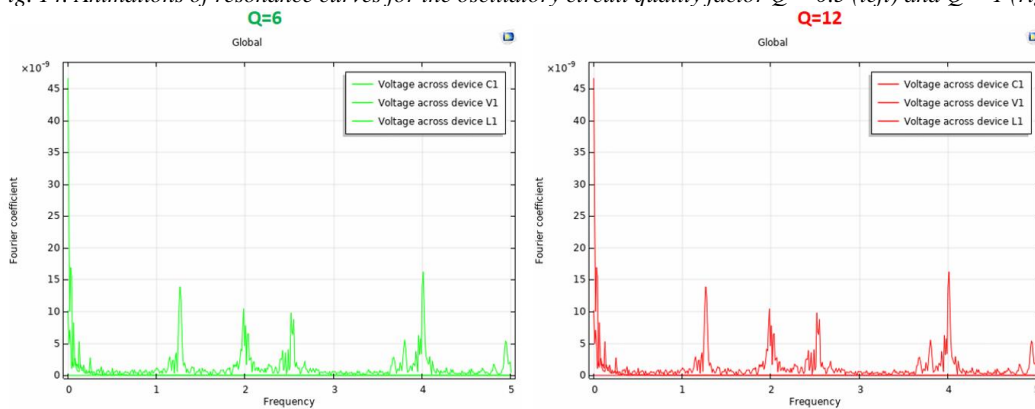


Рис. 15. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура $Q = 6$ (слева) и $Q = 12$ (справа)

Fig. 15. Animations of resonance curves for the oscillatory circuit quality factor $Q = 6$ (left) and $Q = 12$ (right)

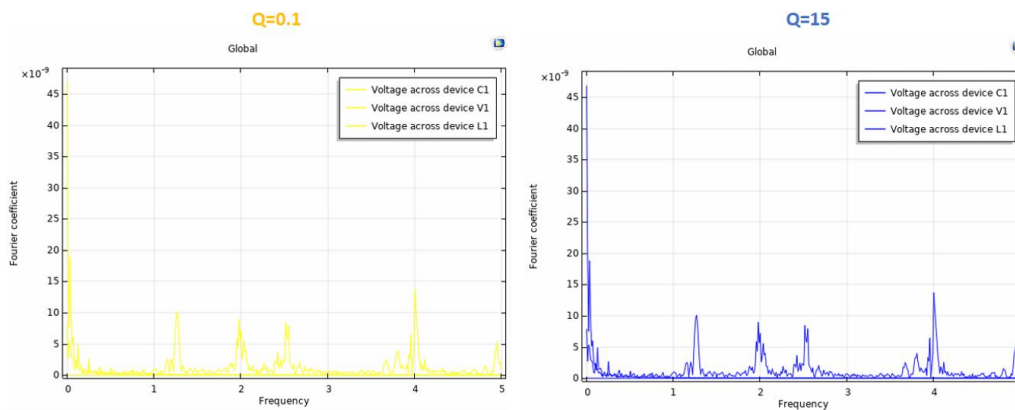


Рис. 16. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура $Q = 0,1$ (слева) и $Q = 15$ (справа)

Fig. 16. Animations of resonance curves for the oscillatory circuit quality factor $Q = 0.1$ (left) and $Q = 15$ (right)

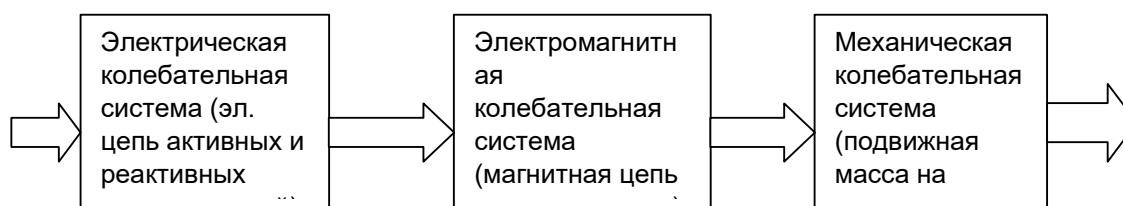


Рис. 17. Функциональная модель ЭМВ НЧК как цепи последовательного преобразования электрической энергии питания в механическую работу

Fig. 17. Functional model of an electromagnetic exciter of low-frequency oscillations as a circuit for the sequential conversion of electrical energy into mechanical work

Анализ анимаций осциллограмм показывает, что при стабильно неизменной индуктивности катушки (0,1 Генри) электромагнита при пошаговом (1 шаг 5 Гц) уменьшении частоты колебаний от 15 Гц до 1 Гц и увеличении емкости конденсатора (от 1 мкФ до 340 мкФ) наиболее плавный процесс модуляции колебаний наступает при частоте 1 Гц и емкости конденсатора 340 мкФ (Рис. 10).

Рассмотрим анимации резонансных кривых при разных значениях добротности Q колебательного контура:

Таким образом, сгенерированная сетка (Рис. 6), анализ анимаций резонансных кривых (Рис. 14–16,) и визуальные анимации колебательных движений якоря электромагнита (Рис. 7–9) показывают периодический процесс устойчивого появления и исчезновения резонанса напряжений, который и служит «исполнительным органом», регулирующим поступление передачи энергии (Рис.17) из электрической подсистемы в магнитную и далее в механическую [25].

Полученные результаты моделирования двухтактного ЭМВ НЧК подтверждают корректность методики построения механической характеристики одноконтурного ЭМВ НЧК, описанного в работе [26].

Выводы:

- на основе функциональной модели двухтактного электромагнитного вибратора переменного тока построена его мультифизическая модель, позволяющая исследовать поведение электромеханической системы в режимах ее функционирования:

подтвержден принцип преобразования высокочастотной составляющей на ее входе в низкочастотную составляющую на выходе при обеспечении условия – «сохранение энергии и мощности при соответствующих преобразованиях» для этой модификации двухтактного ЭМВ НЧК;

- на основе мультифизического моделирования осуществлено корректное представление и визуализация картин колебательных движений якоря электромагнитного вибратора переменного тока, также сгенерирована конечно-элементная сетка модели, подтверждающая корректность алгоритма моделирования и выбора исходных данных объекта;

- выявлена обусловленная линейность элементов в последовательном резонансном контуре в электрической цепи переменного тока,

- анимации и визуализация динамических процессов коррелируют с граничными условиями и теоретическими выкладками при определении активных и пассивных параметров электромеханической системы;

- осуществлен анализ результатов моделирования двухтактного ЭМВ НЧК на предмет соответствия механической характеристике с оптимальной формой активного параметра на выходе во взаимозависимости с активным параметром на входе электромеханической системы (ЭМС).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нитусов Ю. Е. Об одной схеме электромагнитного вибратора. // Электричество. 1956. №5. С. 81–84.
2. Нитусов Ю. Е., Коцюбинский А. И., Гасымов Р. А. Вибропривод. А.с. СССР № 1363392, 30.12.87 г. Бюл. № 48.
3. Нитусов Ю. Е., Коцюбинский А. И., Бабаев И. С. Вибрационный электропривод. А.с. СССР № 1363392, 30.11.87 г. Бюл. № 44.
4. Нитусов Ю. Е., Коцюбинский А. И., Бабаев И. С. Электромагнитный вибратор. А.с. СССР № 1356136, 30.11.87 г., Бюл. № 44.
5. Акчурин А. Г., Нитусов Ю. Е., Туманов И. Е., Аспандияров К. Б. Электромагнитный вибратор. А.с. № 1727927. 23.09.92 г. Бюл. № 15.
6. Туманов И. Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы // Электротехника. 2013. №8. С. 48–52.
7. 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.
8. Tumanov I. E., Orynbayev S. A., Baibutanov B., Kruglikov A., Kaseico P. Modeling of Physical Subsystem Using an Example of Electromagnetic Exciter of Low-frequency Oscillations // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 736. Pp. 97–102. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97).
9. Коцюбинский А. И., Крюков Б. И., Нитусов Ю. Е., Габараев Ф. А. Двухтактный электромагнитный вибратор переменного тока. А.с. № 1405099, 23.06.88 г. Бюл. № 23.
10. Нитусов Ю.Е., Коцюбинский А.И. Двухтактный электромагнитный вибратор. А.с. СССР № 1762371, 15.09.92 г. Бюл. № 34.
11. Туманов И. Е., Орынбаев С. А., Джумаев Д., Алимов А. Трехфазный двухтактный электромагнитный вибратор. Инновационный патент РК № 27955, Опубл. 25.12.2013 г.
12. Нуралиев А. К., Есенбеков А. Ж., Ибадуллаев М. И. Математическая модель электромагнитного вибратора с источником питания на основе инвертора // Вестник МЭИ. 2022. № 1. С. 94–97. DOI: [10.24160/1993-6982-2022-1-94-97](https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-1-94-97).
13. Каржавов Б. Н. Аппроксиматоры синусоидальных функций в электроприводах с управляемым моментом в исполнительных двигателях // Электричество 2015. № 9. С. 39–47.
14. Назаров А. И., Ибадуллаев М. И., Тилляходжаев М. М. Структурная схема электромагнитного вибровозбудителя с амплитудно-частотным управлением // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. 2016. № 3–4. С. 55–59.
15. Афанасьев А. И., Закаменных Ю. Г. Анализ резонансных вибротранспортных машин // Известия вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 107–109.
16. Ибадуллаев М. И., Нуралиев А. К., Есенбеков А. Ж., Назаров А. И. Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 62–66.
17. Антипов В. И., Ефременков Е. Е., Руин А. А., Субботин Ю. О. Повышение энергоэффективности работы вибрационных механизмов за счет возбуждения низкочастотного резонансного режима колебаний // Стекло и керамика. 2007. № 5. С. 13–16.
18. Введение в COMSOL Multiphysics®, электронный учебник: сайт Московского Представительства компании COMSOL Multiphysics®, 2022г.: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf
19. [19] Общие принципы создания моделей в COMSOL Multiphysics®, корпоративный портал Томского политехнического университета: <https://portal.tpu.ru/SHARED/a/ALEXTPUFTF/COMSOL/Tab/%D0%9E%D0%B1%D1%89%D0%B8%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D1%81%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB.pdf>
20. Построение расчетной области средствами COMSOL Multiphysics®, корпоративный портал Томского политехнического университета : <https://edu.tsu.ru/eor/resource/110/html/22.html>
21. Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®: https://www.comsol.com/sc/resources/pdf-offers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization-50_RUS_high.pdf
22. Янкин С. Вибрационный анализ в COMSOL Multiphysics®, вебинар : <https://www.youtube.com/watch?v=CBsbgGzxSjQ>, 2019 г.
23. Henric Sonnerlind. Performing Random Vibration Analyses in COMSOL Multiphysics®. Vebinar : Random Vibration, 2019
24. Курушин А. А. Решение мультифизических задач с помощью САПР Multiphysics®, М.-2016 г.: https://kurushin.ucoz.ru/_ld/0/36_COMSOL__1.pdf
25. Ивашин В. В., Позднов М. В. К вопросу об энергопреобразовании в электромагнитном вибраторе. // Прогрессивные техпроцессы в машиностроении: Труды всероссийской конф. с междунар. участием. Тольятти : ТГУ, 2002. С. 120–125.
26. 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. С. 11..

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Туманов Исакул Елегенович, канд. техн. наук, доцент, Кафедра «Теплофизика и техническая физика», физико-технический факультет, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алма-Ата, Казахстан

Заявленный вклад авторов:

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

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-13-24

Isakul E. Tumanov

Al-Farabi Kazakh National University

* for correspondence: isa.tumani56@mail.ru

CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF A MULTIPHYSICAL MODEL OF A TWO-PULL ELECTROMAGNETIC EXCITER OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONSS



Article info

Received:

13 February 2025

Accepted for publication:

01 March 2025

Accepted:

10 March 2025

Published:

24 March 2025

Keywords: Electromagnetic exciter of low-frequency oscillations, vibration motor, two-stroke.

Abstract.

A push-pull electromagnetic exciter of low-frequency mechanical oscillations (EMF LFMO) with two identical resonant circuits, each of which consists of an inductance and is sequentially connected through its capacitor to the power supply circuit, is considered. To convert the supply voltage frequency (50 Hz) at the input to the low-frequency range of mechanical oscillations, the parameters of the resonant circuits are adjusted. The results of a model study of the object in the COMSOL MULTIPHYSICS environment are presented, obtained taking into account the assumption of conditioned linearity of passive elements in the resonant circuits of an AC electric circuit. Animations of the processes of beating of the input high-frequency signals and their smooth modulation in the low-frequency region at the output and an animation of mechanical oscillations of the anchor are obtained. The analysis of the modeling results for compliance with the mechanical characteristic of the oscillation exciter with the optimal shape of the active parameter at the output in interdependence with the active parameter at the input of the electromechanical system is carried out, and the evolution of the mechanical characteristic is presented: oval - ellipse - circle for all its modifications. Fundamental conclusions and practical recommendations for the application of the results of model studies of an electromagnetic exciter of low-frequency oscillations in a two-stroke design are formulated.

For citation: Tumanov I.E. Construction and analysis of a multiphysical model of a two-pull electromagnetic exciter of low-frequency oscillationss. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 1(177):13-24 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-13-24, EDN: CPYOZA

REFERENCES

1. Nitusov Yu.E. Ob odnoj skheme elektromagnitnogo vibratora. *Elektrichestvo*. 1956; 5:81–84.
2. Nitusov Yu.E., Kocyubinskij A.I., Gasyimov R.A. Vibroprivod. A.s. SSSR № 1363392, 30.12.87 g. Byul. № 48.
3. Nitusov Yu.E., Kocyubinskij A.I., Babaev I.S. Vibracionnyj elektroprivod. A.s. SSSR № 1363392, 30.11.87 g. Byul. № 44.
4. Nitusov Yu.E., Kocyubinskij A.I., Babaev I.S. Elektromagnitnyj vibrator. A.s. SSSR № 1356136, 30.11.87 g., Byul. № 44.
5. Akchurin A.G., Nitusov Yu.E., Tumanov I.E., Aspandiyarov K.B. Elektromagnitnyj vibrator. A.s. № 1727927. 23.09.92 g. Byul. № 15.
6. Tumanov I.E. Parametricheskij elektromagnitnyj vzbuditel' nizkochastotnyh mekhanicheskikh kolebanij dlya sistem kontrolya, izmereniya i dozirovaniya massy. *Elektrotehnika*. 2013; 8:48–52.

7. Tumanov I.E. Elektromagnitnyj vzbuditel' nizkochastotnyh mekhanicheskikh kolebanij. Voprosy teorii, modelirovaniya, razrabotki i prikladnoj znachimosti. *Intellektual'naya Elektrotehnika*. 2021; 1:83–92. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_83.

8. Tumanov I.E., Orynbayev S.A., Baibutanov B., Kruglikov A., Kaceico P. Modeling of Physical Subsystem Using an Example of Electromagnetic Exciter of Low-frequency Oscillations. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 736:97–102. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97.

9. Kocyubinskij A.I., Kryukov B.I., Nitusov Yu.E., Gabaraev F.A. Dvuhtaktnyj elektromagnitnyj vibrator peremennogo toka. A.s. № 1405099, 23.06.88 g. Byul. № 23.

10. Nitusov Yu.E., Kocyubinskij A.I. Dvuhtaktnyj elektromagnitnyj vibrator. A.s.SSSR № 1762371, 15.09.92 g. Byul. № 34.

11. Tumanov I.E., Orynbaev S.A., Dzhumaev D., Alimov A. Trekhfaznyj dvuhtaktnyj elektromagnitnyj vibrator. Innovacionnyj patent RK № 27955, Opubl. 25.12.2013 g.

12. Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Ibadullaev M.I. Matematicheskaya model' elektromagnitnogo vibratora s istochnikom pitaniya na osnove invertora. *Vestnik MEI*. 2022; 1:94–97. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-94-97.

13. Karzhavov B.N. Aproksimatory sinusoidal'nyh funkcij v elektroprivodah s upravlyaemym momentom v ispolnitel'nyh dvigatelyah. *Elektrichestvo*. 2015; 9:39–47.

14. Nazarov A.I., Ibadullaev M.I., Tillyahodzhaev M.M. Strukturnaya skhema elektromagnitnogo vibrovzbuditel'ya s amplitudno-chastotnym upravleniem. *Problemy energo- i resursosberezheniya*. 2016; 3–4:55–59.

15. Afanas'ev A.I., Zakamennyh Yu. G. Analiz rezonansnyh vibrotransportnyh mashin. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2008; 8:107–109.

16. Ibadullaev M.I., Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Nazarov A.I. Rezonansnyj elektromagnitnyj vibrovzbuditel' kolebanij s obratnoj svyaz'yu. *Vestnik MEI*. 2020; 1:62–66.

17. Antipov V.I., Efremenkov E.E., Ruin A.A., Subbotin Yu.O. Povyshenie energoeffektivnosti raboty vibracionnyh mekhanizmov za schet vzbuzhdeniya nizkochastotnogo rezonansnogo rezhima kolebanij. *Steklo i keramika*. 2007; 5:13–16.

18. Vvedenie v COMSOL Multiphysics®, elektronnyj uchebnik: sayt Moskovskogo Predstavitel'stva kompanii COMSOL Multiphysics®, 2022g.: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf

19. [19] Obshchie principy sozdaniya modelej v COMSOL Multiphysics®, korporativnyj portal Tomskogo politekhnicheskogo universiteta: <https://portal.tpu.ru/SHARED/a/ALEXTPUFTF/COMSOL/Tab/%D0%9E%D0%B1%D1%89%D0%B8%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BF%D1%8B%20%D1%81%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB.pdf>

20. Postroenie raschetnoj oblasti sredstvami COMSOL Multiphysics®, korporativnyj portal Tomskogo politekhnicheskogo universiteta : <https://edu.tsu.ru/eor/resource/110/html/22.html>

21. Osnovy postobrabotki i vizualizacii v COMSOL Multiphysics®: https://www.comsol.com/sc/resources/pdf-of-fers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization-50_RUS_high.pdf

22. Yankin S. Vibracionnyj analiz v COMSOL Multiphysics®, webinar : <https://www.youtube.com/watch?v=CBsbgGzxSJQ>, 2019.g.

23. Henric Sonnerlind. Performing Random Vibration Analyses in COMSOL Multiphysics®. Webinar : Random Vibration, 2019

24. Kurushin A.A. Reshenie mul'tifizicheskikh zadach s pomoshch'yu SAPR Multiphysics®, M.-2016 g.: https://kurushin.ucoz.ru/_ld/0/36_COMSOL__1.pdf

25. Ivashin V.V., Pozdnov M.V. K voprosu ob energopreobrazovanii v elektromagnitnom vibratore. *Progressivnye tekhnologicheskie tekhprocessy v mashinostroenii: Trudy vsereossijskoj konf. c mezhdunar. uchastiem*. Tol'yatti: TGU; 2002. S. 120–125.

26. Tumanov I.E. Parametricheskij sintez mekhanicheskoi harakteristiki elektromagnitnogo vzbuditel'ya nizkochastotnyh kolebanij na osnove metodov analiticheskoi geometrii i ego mul'tifizicheskoe modelirovanie. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. 2023; 10:11.

© 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 E. Tumanov, Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor, Department of Thermophysics and Technical Physics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Contribution of the authors:

Isakul E. Tumanov – formulation of a research task, scientific management, conceptualization of research, writing text, conclusions, data collection and analysis.

Authors have read and approved the final manuscript.

