

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 537.868

EDN: BLIGHS

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-1-107-122



Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбуждателя низкочастотных колебаний с четырёхконтурным силовым модулем

И.Е. Туманов¹✉¹Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алма-Ата, Казахстан

Резюме. Целью научной разработки является создание реверсивной электрической машины переменного тока вращательного движения на основе четырёхконтурного силового модуля электромагнитного возбуждателя низкочастотных механических колебаний, являющегося электрической машиной возвратно-поступательного (колебательного) движения. Объектом исследований служит трёхфазный электромагнитный возбуждатель низкочастотных механических колебаний, силовой модуль которого состоит из спаренных четырех идентичных резонансных контуров. Контуров включают индуктивность и последовательно включенный конденсатор в цепь питания. Конструирование данной электрической машины проводили в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS. Для преобразования частоты напряжения питания (50 Гц) во входной цепи в низкочастотный диапазон механических колебаний на выходе каждого силового модуля осуществлялась настройка параметров (последовательно включенных) индуктивности катушки и конденсатора на резонанс напряжений. Для создания усиленного вращающего момента спаренные контуры силовых модулей поочередно воздействуют на якорь, расположенный в центре по аналогии с электрическими машинами вращательного движения. Полученные в результате компьютерного моделирования анимации процессов биений входных высокочастотных сигналов внутри медленно изменяющейся синусоиды тягового усилия демонстрируют возможность их плавной модуляции в низкочастотной области на выходе. Также полученные данные демонстрируют возможность создания реверсивного вращательного движения якоря электромагнита при изменении полярности (направления движения электрических токов) соответствующих пар в резонансных контурах, выполненных с учетом допущения обусловленной линейности пассивных элементов в резонансных контурах электрической цепи переменного тока и линеаризации зависимости активных параметров от пассивных. Таким образом, можно рекомендовать следующие области применения электромагнитных возбуждателей низкочастотных механических колебаний: в двигательном режиме функционирования – в качестве исполнительного органа в технологических процессах перемешивания и подготовки жидких продуктов до однородной консистенции, в генераторном – в качестве преобразователя энергии возобновляемых источников в электрическую.

Ключевые слова: электромагнитный возбуждатель низкочастотных колебаний, вибродвигатель, двухтактный, трехфазный

Для цитирования: Туманов И.Е. Конструирование и анализ мультифизической модели трёхфазного электромагнитного возбуждателя низкочастотных колебаний с четырёхконтурным силовым модулем // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 1. С. 107–122. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-107-122>. EDN: BLIGHS.

POWER ENGINEERING

Original article

Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations with a four-circuit power module

Isakul E. Tumanov¹✉¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract. The creation of a reversible AC electric machine with rotary motion based on a four-circuit power module of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical oscillations, i.e., an electric machine of reciprocating (oscillatory) motion, represents a relevant research task. The research object includes a three-phase electromagnetic

exciter of low-frequency mechanical oscillations, whose power module consists of four paired identical resonant circuits. The circuits include an inductor and a capacitor connected in series in the power supply circuit. The design of this electric machine was carried out using the COMSOL MULTIPHYSICS software environment. In order to convert the frequency of the supply voltage (50 Hz) in the input circuit to the low-frequency range of mechanical oscillations at the output of each power module, the parameters of the series-connected inductance of the coil and capacitor were adjusted to achieve voltage resonance. In order to generate an increased torque, the paired circuits of the power modules alternately acted on the anchor located in the center by analogy with electric machines of rotary motion. The animations depicting the processes of beating of the input high-frequency signals inside a slowly changing sinusoid of the traction force obtained as a result of computer simulation demonstrate the possibility of their smooth modulation in the low-frequency region at the output. The obtained data also demonstrate the possibility of creating a reversible rotary motion of the electromagnet anchor when changing the polarity (direction of movement of electric currents) of the corresponding pairs in the resonant circuits, performed taking into account the assumption of conditioned linearity of passive elements in the resonant circuits of the alternating current electric circuit and the linearization of the dependence of active parameters on passive ones. The following areas of application of electromagnetic exciters of low-frequency mechanical vibrations can be recommended: (1) in the motor mode of operation, as an actuator in technological processes of mixing and preparing liquid products to a homogeneous consistency; (2) in the generator mode, as a converter of energy from renewable sources into electrical energy.

Keywords: electromagnetic exciter of low-frequency oscillations, vibration motor, two-stroke, three-phase

For citation: Tumanov I.E. Design and analysis of a multiphysical model of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency oscillations with a four-circuit power module. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):107-122. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-107-122>. EDN: BLIGHS.

ВВЕДЕНИЕ

Создателем электромагнитных возбуждателей низкочастотных колебаний электромагнитного возбуждателя низкочастотных механических колебаний (ЭМВ НЧК) и основоположником теории функционирования является Ю.Е. Нитусов. В технической литературе – «вибродвигатели серии типа МВТУ» (Московского высшего технического училища имени Н.Э. Баумана) [1]. Впервые схема такого преобразователя была предложена и описана им в журнале «Электричество» [1]. Направление исследований получило продолжение в личных трудах Ю.Е. Нитусова и трудах его талантливых учеников: А.И. Коцюбинского, Б.И. Крюкова, З.А. Кулиева, Н.М. Полякова, И.С. Бабаева, Р.А. Гасимова, 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 одноктактный, однофазный двухтактный, однофазный с четырехсторонним воздействием на якорь электромагнита, трехфазный одноктактный, трехфазный двухтактный и трехфазный с четырехсторонним воздействием²⁻⁸ на якорь электромагнита (рис. 1).

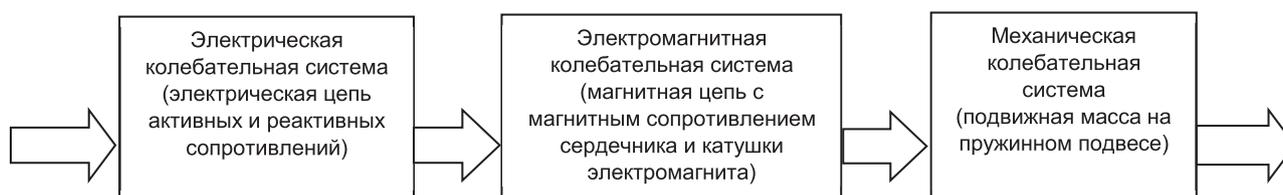


Рис. 1. Функциональная модель электромагнитного возбуждателя низкочастотных механических колебаний как цепи последовательного преобразования электрической энергии питания в механическую работу

Fig. 1. Functional model of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations as a chain of electrical energy serial conversion into mechanical work

²А.с. № 1762371, СССР, А1, Н 02 К 33/14. Двухтактный электромагнитный вибратор / А.И. Коцюбинский, Ю.Е. Нитусов, В.А. Щербинин. Заявл. 20.03.90; опубл. 15.09.92. Бюл. № 34.

³А.с. № 1363392, СССР, А1, Н 02 К 33/12, В 06 В 1/04. Вибропривод / Ю.Е. Нитусов, А.И. Коцюбинский, Р.А. Гасимов. Заявл. 19.05.86; опубл. 30.12.87. Бюл. № 48.

⁴А.с. № 912476, СССР, В 23 Р 19/04. Устройство для вибрационной сборки изделий / Ю.К. Мяскин, Д.А. Кудасов, В.Я. Мяскина, Ю.Е. Нитусов. Заявл. 29.04.80; опубл. 15.03.82. Бюл. № 10.

Области применения ЭМВ НЧК: в двигательном режиме функционирования – в качестве исполнительного органа в технологических процессах перемешивания и подготовке жидких продуктов до однородной консистенции [2], в генераторном – в качестве преобразователя энергии возобновляемых источников в электрическую [3]. Применение метода исследований – САПР (системы автоматизированного проектирования) в области электромеханики.

Целью научной разработки является конструирование реверсивной электрической машины переменного тока вращательного движения на основе четырехконтурного силового модуля электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний, являющегося электрической машиной возвратно-поступательного (колебательного) движения.

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

– выявить и определить аналогии между электрическими машинами вращательного движения и возвратно-поступательного движения и провести патентно-лицензионный поиск по базам патентов Союза Советских Социалистических Республик (СССР), Российской Федерации (РФ) и Республики Казахстан (РК) на предмет определения аналогов и прототипов исследуемого объекта;

– определить методы и выбрать инструменты для конструирования объекта исследования.

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ

Модель будем создавать на основе аналогов и прототипов изобретений из базы патентов СССР⁸ и РК⁷.

Известно техническое решение по авторскому свидетельству⁸, в котором описан виброривод. В нем для расширения функциональных возможностей создаются сложные плоскостные траектории движения якоря в виде фигур Лиссажу. Вибропривод содержит две пары электромагнитов, расположенных

в паре друг против друга в перпендикулярных плоскостях по горизонтальной и вертикальной осям. При этом первая обмотка электромагнита через конденсатор включается в блок питания, а противоположный – ко входу фазовращателя, к выходам которого подключаются через свои конденсаторы обмотки другой пары электромагнитов так, что силовое воздействие канала на якорь через фазовращатель не совпадает по времени с каналом, содержащим электромагниты, расположенные по горизонтальной оси. Это временное рассогласование, определяемое углом сдвига фаз, и приводит к возникновению сложного плоскопараллельного движения якоря, закрепленного на упругой подвижной системе. В нашем случае для обеспечения вращательного движения якоря вместо упругой подвижной системы используем конструкцию свободного вращения якоря вокруг собственной оси.

При создании мультифизической модели будем руководствоваться следующей принципиальной схемой, в которой имеются 4 силовых вибромодуля по аналогии с электромагнитным вибратором⁷ и виброприводом⁹:

В качестве основного инструмента конструирования выбираем программный продукт Comsol Multiphysics.

Для реализации конструирования мультифизической модели ЭМВ НЧК в программной среде Comsol Multiphysics алгоритм действий следующий:

1. Установка и построение геометрической модели с четырехконтурным силовым модулем ЭМВ НЧК (рис. 2).

2. Описание физического принципа функционирования ЭМВ НЧК.

3. Определение и выбор конструктивных материалов элементов и модулей ЭМВ НЧК.

4. Определение уравнений физических процессов для построения конечно-элементной сетки для численного решения (Mesh).

5. Конструирование и создание модели в зависимости от формы и физики процессов (Moving Mesh).

⁵А.с. № 1356136, СССР, А 1, Н02К 33/12, В06В 1/04. Электромагнитный вибратор / Ю.Е. Нитусов, А.И. Коцюбинский, И.С. Бабаев. Заявл. 02.10.85; опубл. 30.11.87. Бюл. № 44.

⁶А.с. № 1405099, СССР, А 1, Н 02 К 33/14. Двухтактный электромагнитный вибратор переменного тока / А.И. Коцюбинский, Б.И. Крюков, Ю.Е. Нитусов, Ф.А. Габараев. Заявл. 27.09.84; опубл. 23.06.88. Бюл. № 23.

⁷А.с. № 1727927, СССР, А 1, В 06 В 1/04. Электромагнитный вибратор / А.Г. Акчурин, Ю.Е. Нитусов, И.Е. Туманов, К.Б. Аспандияров. Заявл. 17.01.90; опубл. 23.04.92. Бюл. № 15.

⁸А.с. № 1332475, СССР, А 1, Н 02 К 33/02. Вибропривод / А.И. Коцюбинский, С.А. Коцюбинский, Ю.Е. Нитусов. Заявл. 27.09.84; опубл. 23.08.1987. Бюл. № 31.

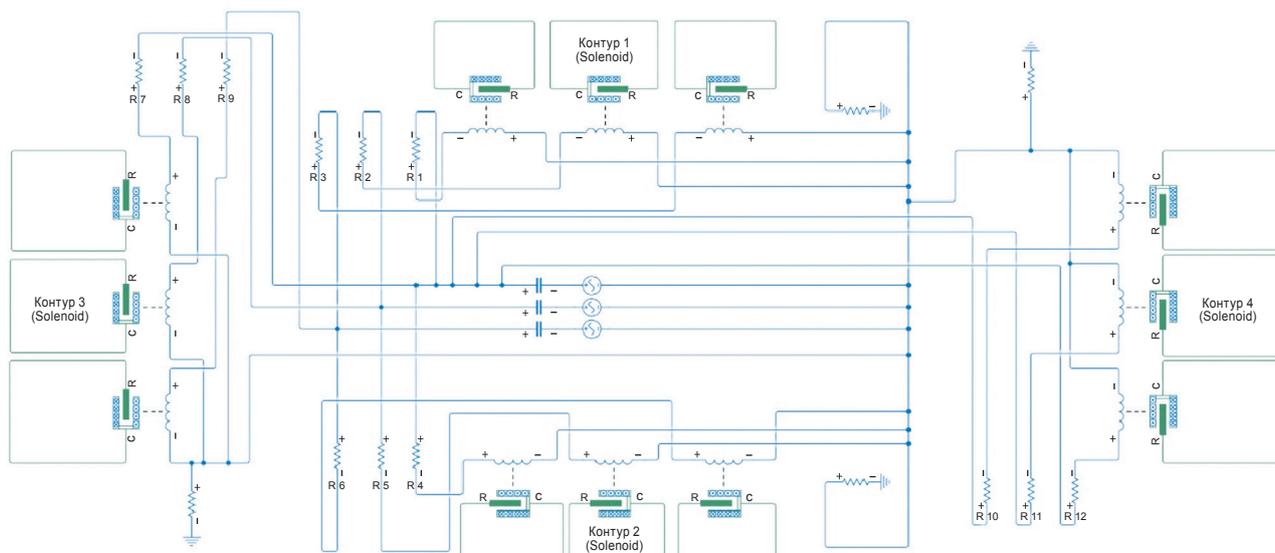


Рис. 2. Принципиальная схема трехфазного электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний с четырехконтурным силовым модулем

Fig. 2. Schematic diagram of a three-phase electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations with a four-circuit power module

Выполняем пошагово все действия в соответствии с алгоритмом построения модели.

Шаг 1: построение геометрической модели. В конструкции якоря предусмотрим четыре полюсных наконечника, расположенных по диагонали равноудаленно так, чтобы при вращении якоря мы могли фиксировать его положение в любой момент времени. По четырем сторонам якоря расположим 4 спа-

ренных электромагнита с трехфазным питанием (рис. 3).

При создании геометрии был выбран стержень с размерами: высота с плунжером – 75 мм; ширина – 45 мм; толщина – 15 мм. Размеры рулона: высота – 40 мм; ширина – 16 мм; количество обмоток – 500 шт.; диаметр проволоки – 1,5 мм (рис. 4, размеры приведены для одной фазы).

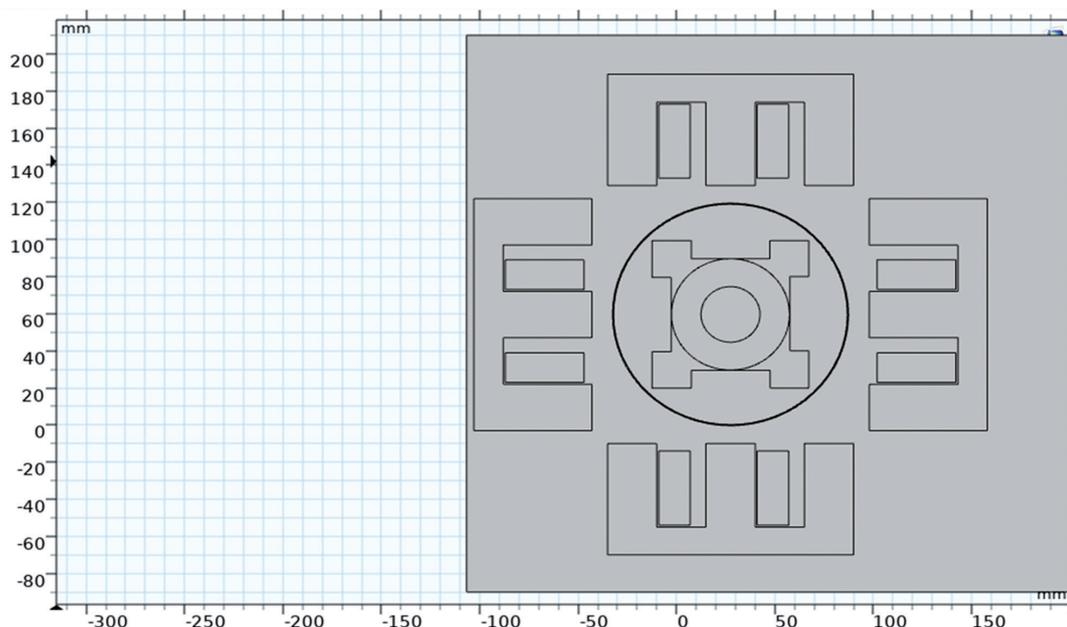


Рис. 3. Геометрическая модель трехфазного четырехконтурного силового модуля электромагнитного возбудителя низкочастотных механических колебаний

Fig. 3. Geometric model of a three-phase four-circuit power module of an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

Название	Значения	Описание
em_w	100[mm]	Width, electromagnet
em_h	60[mm]	Height, electromagnet
core_w	30[mm]	Width, core
pl_h	15[mm]	Height, plunger
plunger_travel	6[mm]	Total stroke, plunger
N	500	Number of turns, primary coil
d	1.35[N*s/m]	Damping constant, return spring
kr	24.2[N/m]	Spring constant, return spring
l0	plunger_travel*0.1	Undeformed length, contact spring
op	plunger_travel*0.7	Opening, electrical contact
dc	2.7[mm]	Diameter, shading coil
kc	255[N/m]	Spring constant, contact spring
c	7[N*s/m]	Damping coefficient, contact spring

Рис. 4. Задание геометрических параметров модели для одного контура силового модуля
 Fig. 4. Setting geometric parameters of the model for one contour of the power module

Шаг 2: Описание физического принципа функционирования ЭМВ НЧК, постановка задачи и настройка физического интерфейса. Задачей данного моделирования было исследование условий резонанса и создание рабочей схемы вибродвигателя. Граничные условия для модели задаются при настройке физического интерфейса. Между плунжером и штоком

добавляется пружинный демпфер. Задаются параметры обмотки и питание обмотки конденсатора (рис. 5).

Поскольку на якорь воздействует трехфазный Ш-образный электромагнит с трехфазным симметричным питанием, то на выходе системы мы должны получить гармонический синусоидальный сигнал вращательного движения якоря (рис. 6).

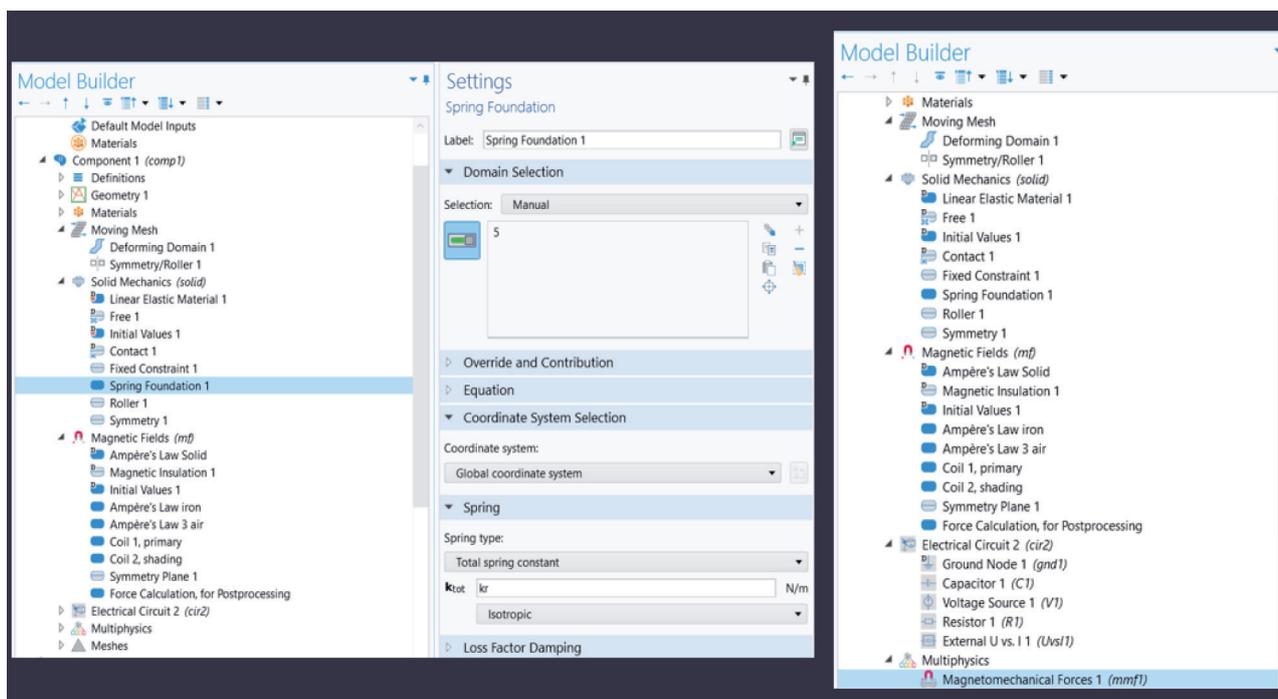


Рис. 5. Настройка физического интерфейса и граничных условий
 Fig. 5. Setting up physical interface and boundary conditions

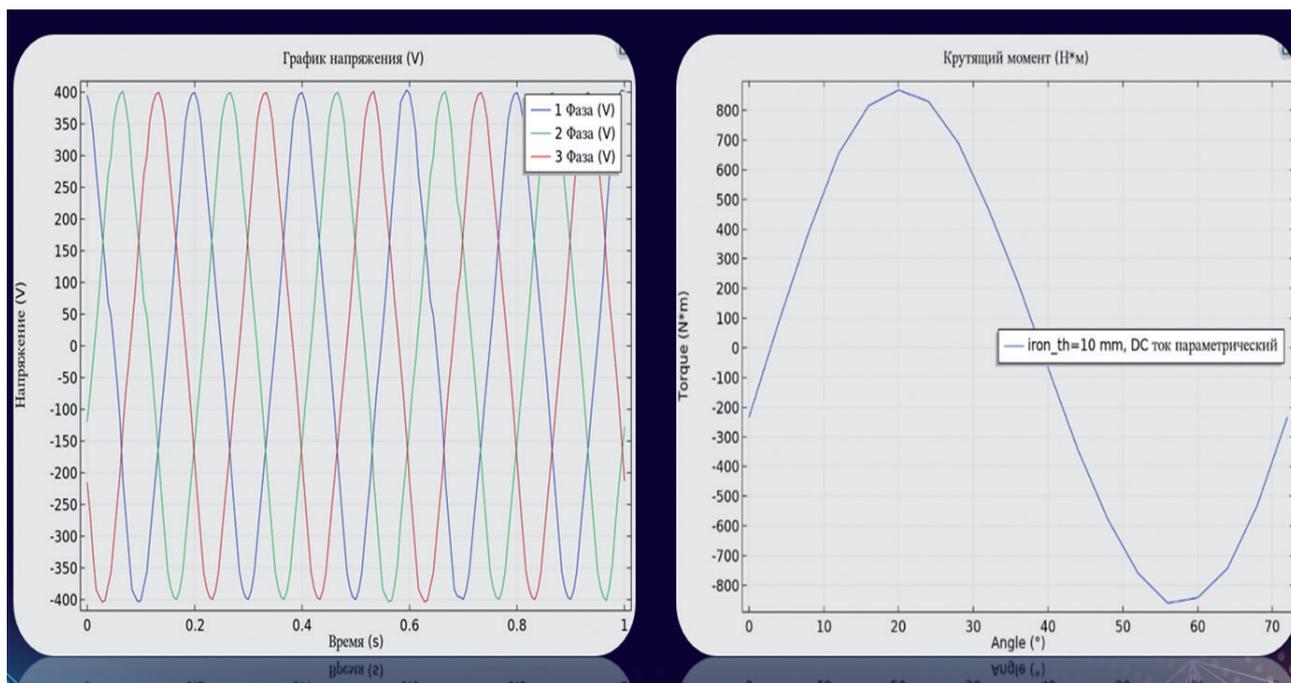


Рис. 6. Гармонические входные и выходные параметры мультифизической модели

Fig. 6. Harmonic input and output parameters of a multiphysical model

Картина силовых линий магнитного потока одной пары показана на рис. 7.

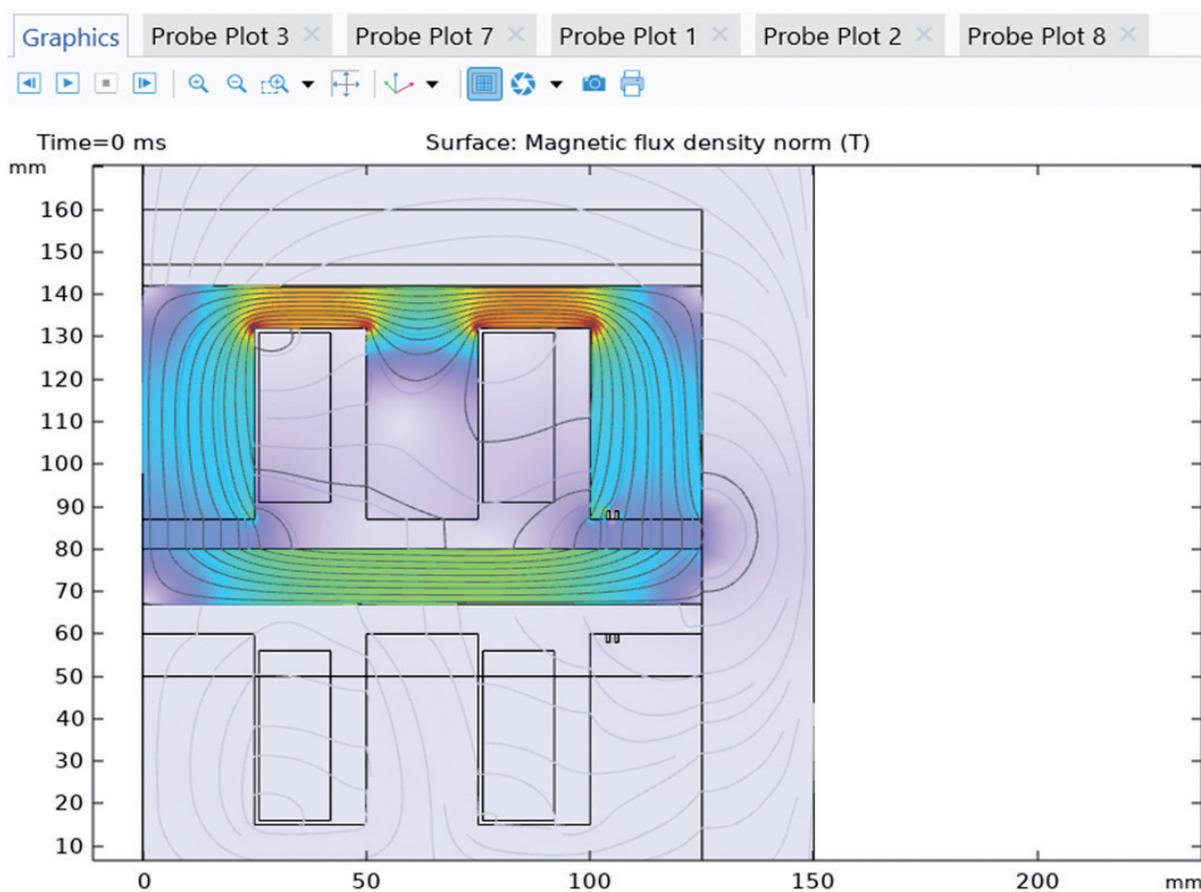


Рис. 7. Распределение силовых линий магнитного потока для одной пары контуров силового модуля

Fig. 7. Distribution of magnetic flux lines of force for one pair of power module circuits

Шаг 3: Выбор конструкционных материалов. Воздух (желтая часть) – «Воздух» в разделе «Материалы» относится к заранее определенному материалу по его физическим свойствам, таким как плотность, теплопроводность и теплоемкость. «Мягкое железо» (серая и синяя части) представляет собой определенный материал с соответствующими магнитными и физическими свойствами, такими как высокая магнитная проницаемость и низкая коэрцитивная сила. «Алюминий» (красная часть) – это материал с высокой проводимостью, который может эффективно проводить электричество, сводя к минимуму потери энергии (рис. 8).

Шаг 4: Определение уравнений физических процессов для построения конечно-элементной сетки для численного решения (Mesh). Переходные модели включают в себя вычисление изменяющегося во времени решения. Для этого программа запускается с заданными начальными условиями и рассчитывает эволюцию неизвестных, используя одну из нескольких различных схем интегрирования по времени. Иногда они собираются медленно или не собираются

вовсе. В данной статье приведены рекомендации необходимых действий в таких ситуациях.

Эти уравнения могут представлять собой набор независимых обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) или набор связанных уравнений, возникающих в результате пространственной дискретизации краевой задачи с использованием метода конечных элементов. Большинство задач COMSOL, решающих для полей, изменяющихся во времени и пространстве, относится ко второй категории. Вместе с приведенным выше уравнением программа может рассматривать набор общих алгебраических уравнений: $M(u,t) = 0$ и эти две системы уравнений.

Дифференциально-алгебраические уравнения (ДАУ) образуют систему. Именно эта система ДАУ полностью определяет модель перехода u_{unit} с набором начальных условий. Следует также отметить, что можно рассматривать модели с большим количеством производных по времени, которые просто требуют введения дополнительных промежуточных переменных. Добавлены два узла, связанных

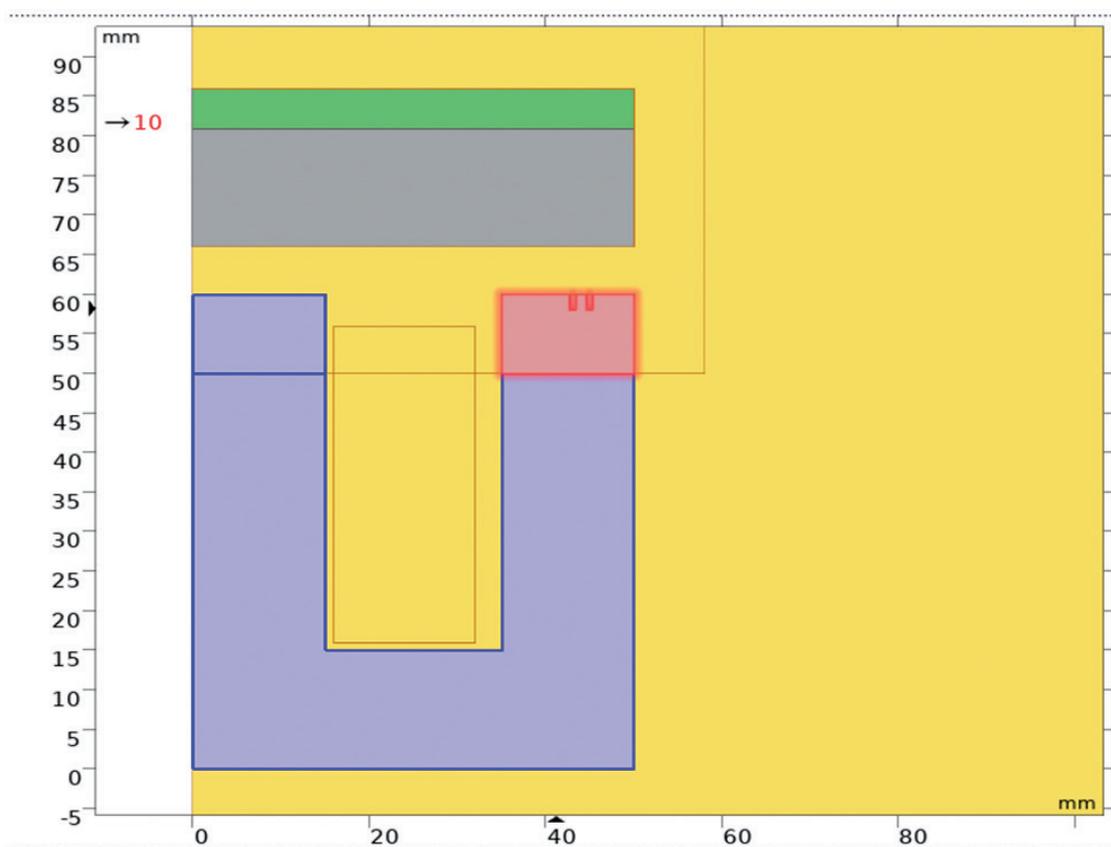


Рис. 8. Выбор конструкционных материалов на примере одной фазы контура силового модуля
Fig. 8. Selection of structural materials for the case of one phase of the power module circuit

с движущейся сеткой во время создания сетки: деформируемая область и граничное условие «Symmetry/Roller». Механическое перемещение контактного элемента использовалось во избежание полного закрытия воздушных отверстий, поскольку такое изменение топологии было несовместимо с подвижной сеткой (в вентиляционных отверстиях). Кроме того, поскольку сетка (рис. 9) становится более искаженной при закрытии отверстий, следует включить опцию автоматического отключения в узле шага исследования [4–13].

Шаг 5: Конструирование и создание модели в зависимости от формы и физики процессов (Moving Mesh). В ходе исследования и создания данной модели были получены графики изменения силы тока и перемещения плунжера. В результате мы можем проанализировать изменения тока в основной и затеняющей (короткозамкнутой) катушках (рис. 10).

В соответствии с резонансом напряжений в силовом контуре индуктивное сопро-

тивление (X_L) и емкостное сопротивление (X_C) в электрической цепи равны друг другу по модулю, такое состояние называется равновесием. В данном случае добротность (безразмерный параметр, который показывает насколько сильно ослаблены генератор или резонатор) описывает, насколько быстро затухают колебания в цепи после выключения источника колебаний. Чем выше добротность, тем медленнее затухают колебания. В случае равенства модулей $X_L = X_C$ добротность контура достигает максимального значения, т.е. колебания в контуре затухают очень медленно. Это состояние используется во многих приложениях, таких как проектирование резонансных цепей, содержащих резонансные контуры.

После выполнения всех этапов моделирования трехфазного четырехконтурного силового модуля на базе ЭМВ НЧК можем посмотреть анимации вращательного движения якоря (рис. 11–14).

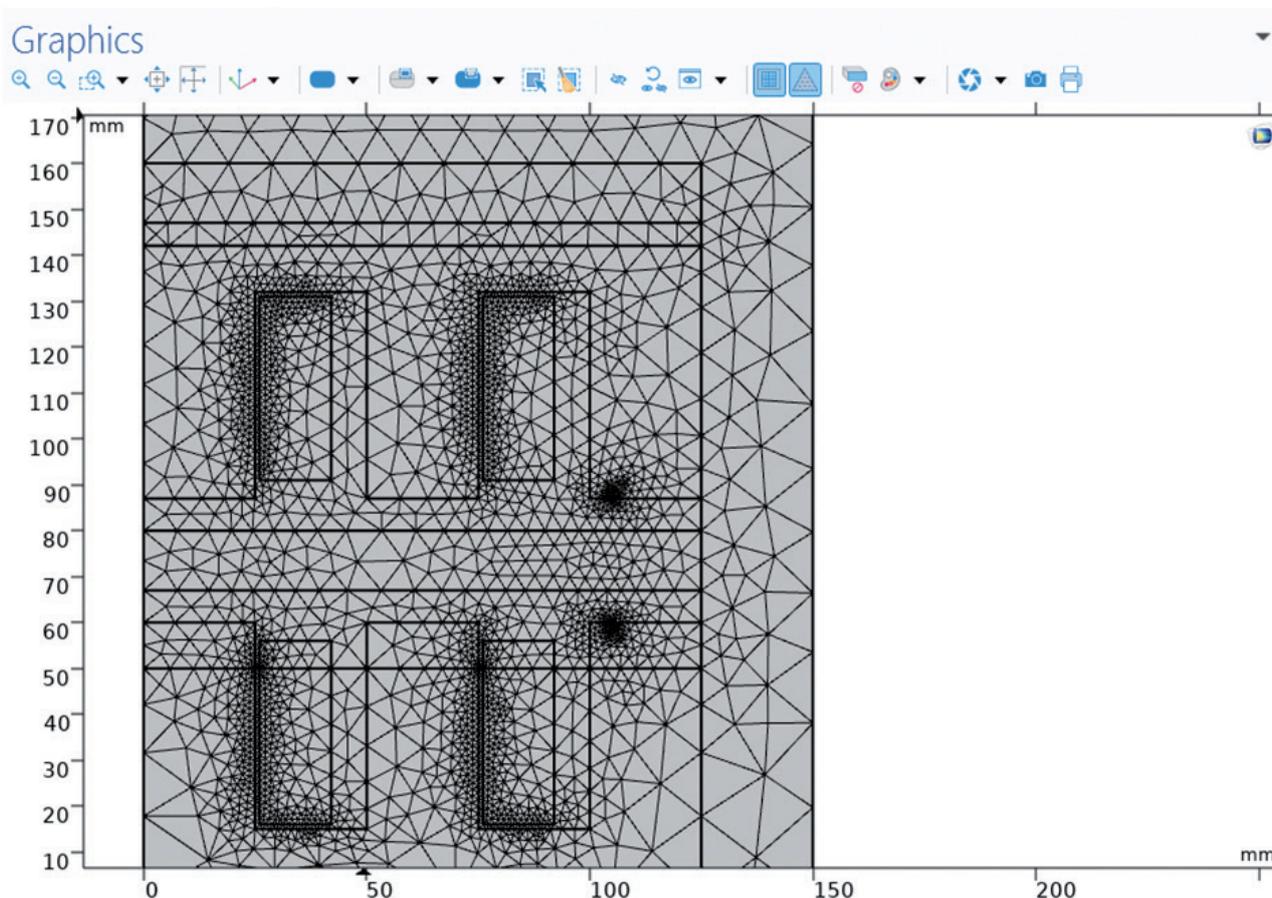


Рис. 9. Конечно-элементная сетка для одной пары трехфазного силового контура

Fig. 9. Finite element grid for one pair of a three-phase power circuit

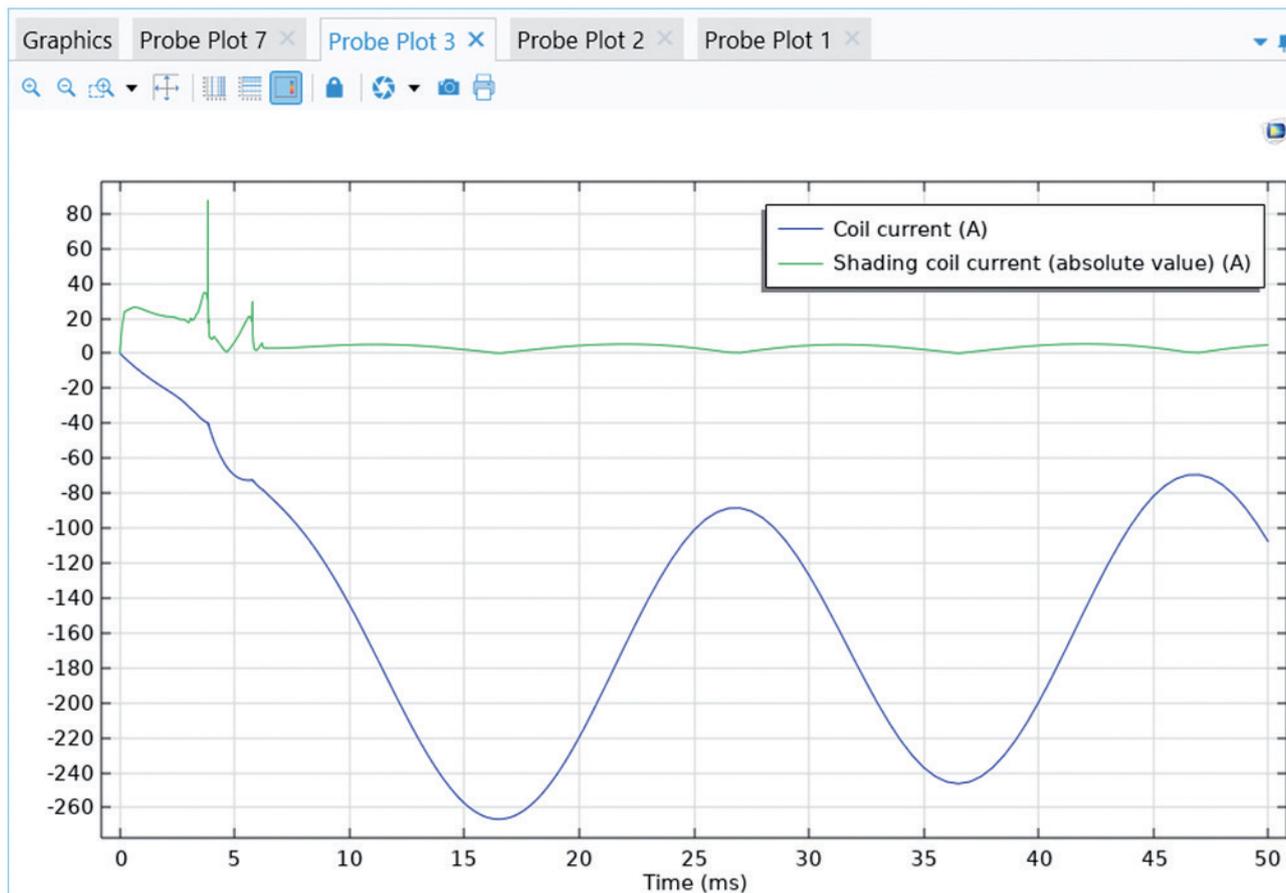


Рис. 10. Графики изменения тока и величины смещения плунжера в обмотке катушки для одной пары контуров силового модуля

Fig. 10. Graphs of current and coil winding plunger displacement value variations for one pair of the power module circuits

ЭМВ НЧК с четырехконтурным силовым модулем отличается от одноконтурного и двухконтурного тем, что вместо возвратно-посту-

пательного (колебательного) якорь совершает реверсивное вращательное движение, как в синхронной машине переменного тока.

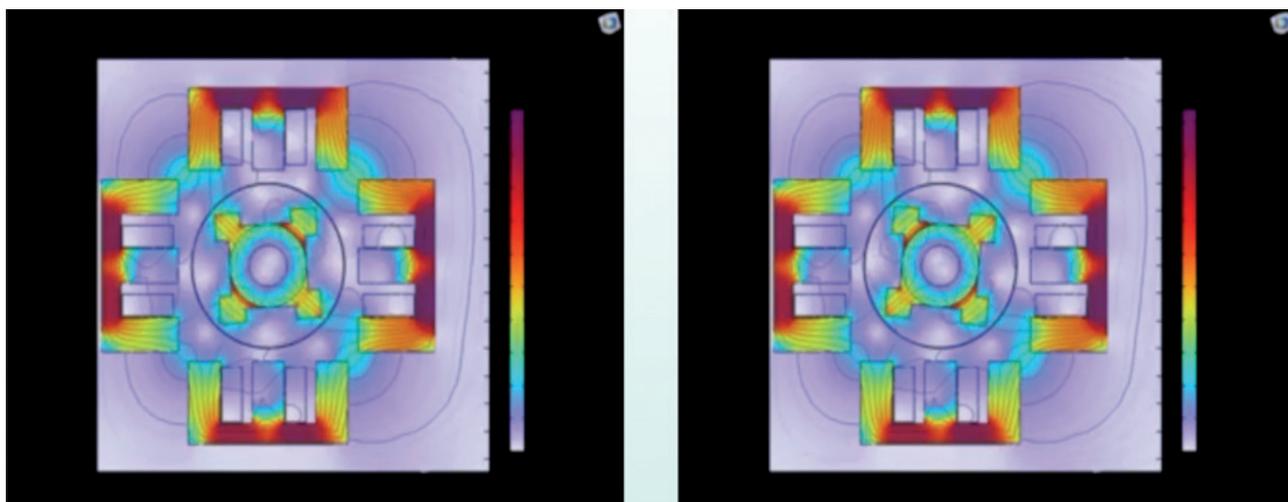


Рис. 11. Анимация вращательного движения якоря четырехконтурного силового модуля в начальном положении (слева – вращение по часовой стрелке, справа – вращение против часовой стрелки)

Fig. 11. Animation of four-circuit power module armature rotation in the initial position (left – clockwise rotation, right – counterclockwise rotation)

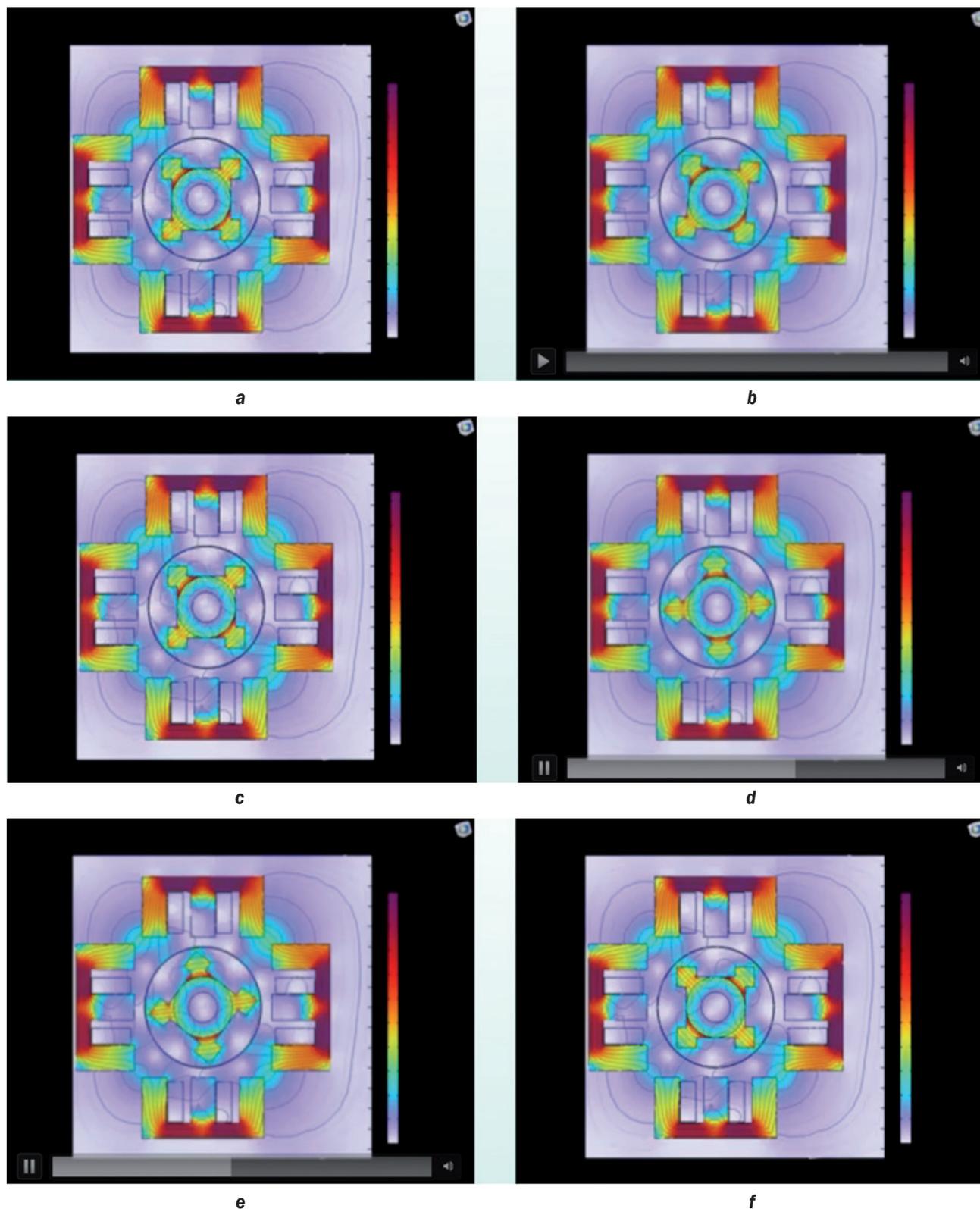


Рис. 12. Анимация вращательного движения якоря (слева (a, c, e) – по часовой стрелке, справа (b, d, f) – против часовой стрелки)

Fig. 12. Animation of armature rotation (left (a, c, e) – clockwise rotation, right (b, d, f) – counterclockwise rotation)

Функцию реверса выполняем в соответствии с [11]. Анализ анимаций осциллограмм процесса биений и модуляции колебаний ре-

зонансного контура – при разных значениях частоты, индуктивности катушки и емкости конденсатора.

Анализ анимаций осциллограмм показывает, что при стабильно неизменной индуктивности катушки (0,1 Гн) 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. 13). Визуальные анимации колебательных движений якоря электромагнита (рис. 14–16)

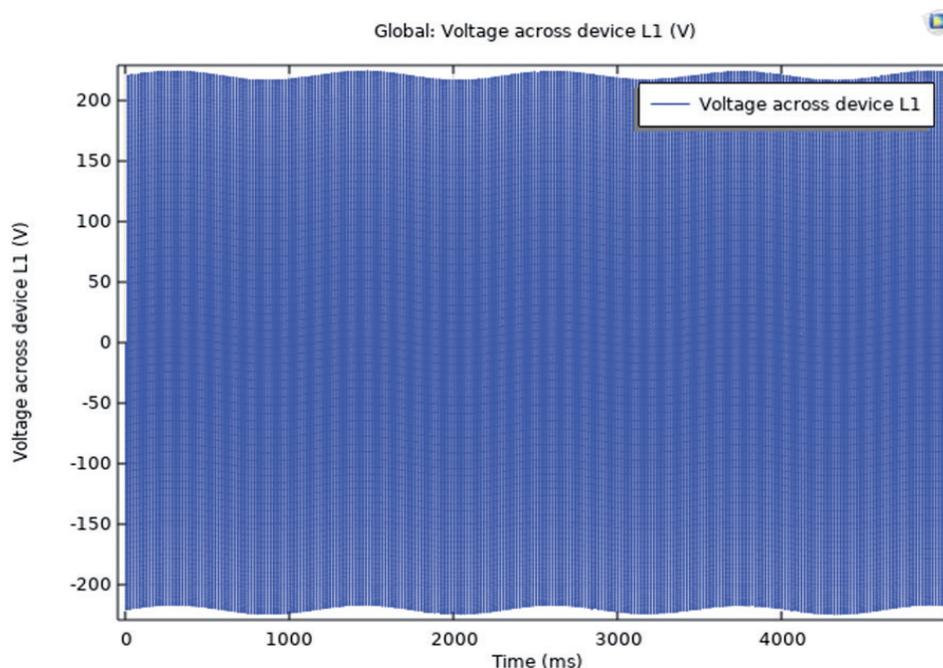


Рис. 13. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при частоте 1 Гц, индуктивности 0,1 Гн, емкости конденсатора 340 мкФ

Fig. 13. Oscillogram of oscillation beating and modulation at the frequency of 1 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 340 μF

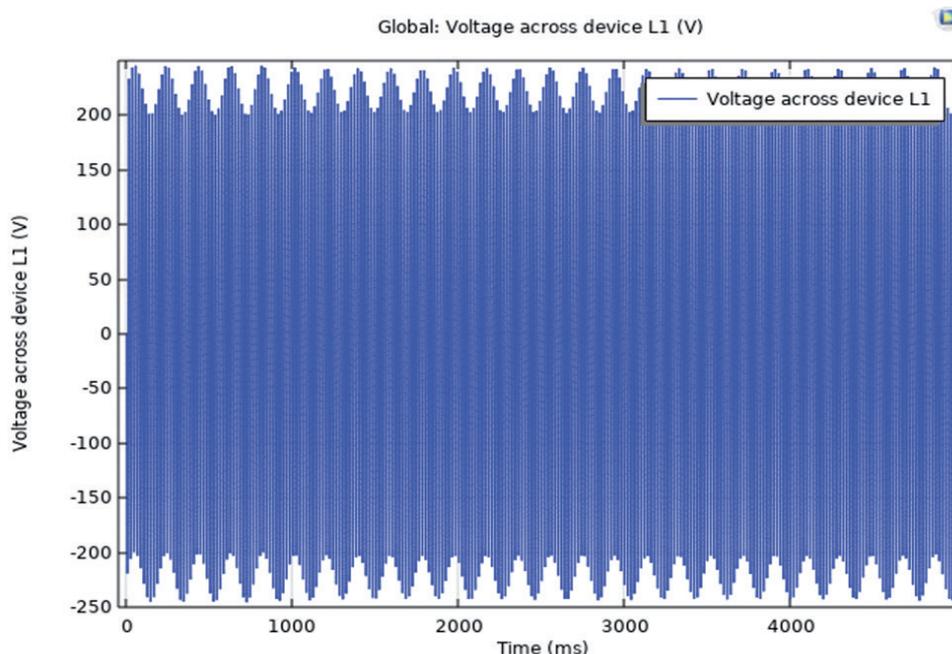


Рис. 14. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при частоте 5 Гц, индуктивности 0,1 Гн, емкости конденсатора 9,5 мкФ

Fig. 14. Oscillogram of oscillation beating and modulation at a frequency of 5 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 9.5 μF

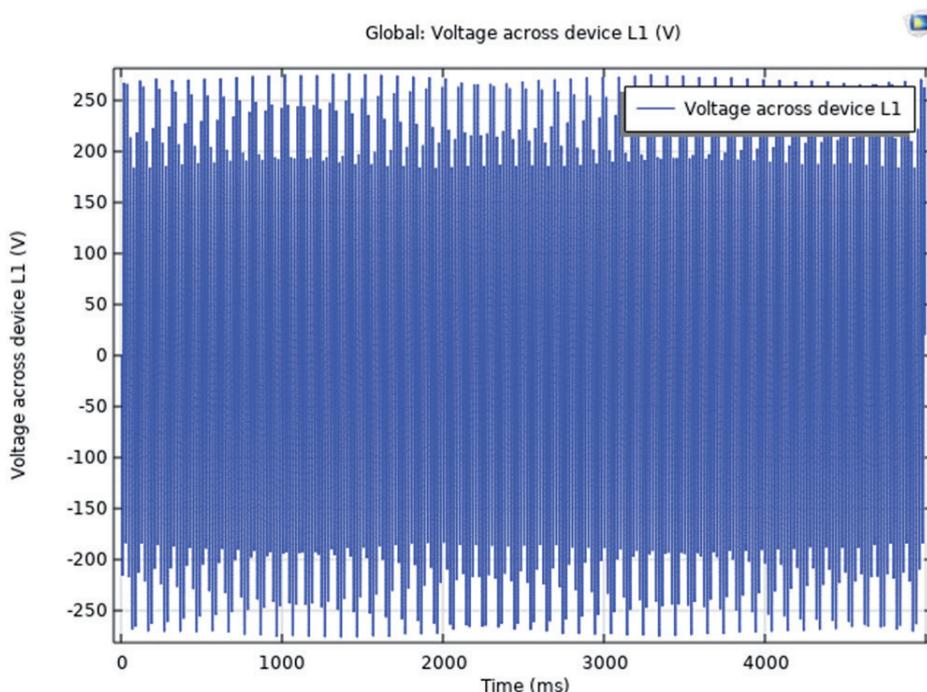


Рис. 15. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при частоте 10 Гц, индуктивности 0,1 Гн, емкости конденсатора 2,5 мкФ

Fig. 15. Oscillogram of oscillation beating and modulation at a frequency of 10 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 2.5 μF

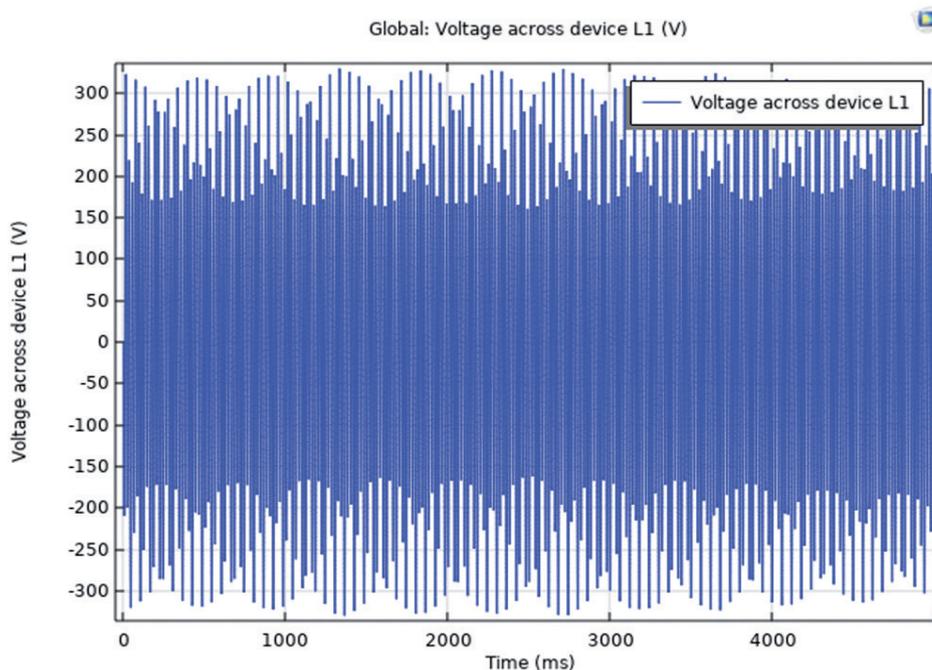


Рис. 16. Осциллограмма процесса биений и модуляции колебаний при частоте 15 Гц, индуктивности 0,1 Гн, емкости конденсатора 1 мкФ

Fig. 16. Oscillogram of oscillation beating and modulation at a frequency of 15 Hz, inductance of 0.1 H, capacitor capacitance of 1 μF

показывают периодический процесс устойчивого появления и исчезновения резонанса напряжений [14–21]. Процесс вращательного движения якоря становится

возможным благодаря поочередному воздействию пары сил (вращающий момент) четырехконтурного силового модуля ЭМВ НЧК (см. рис. 6).

Рассмотрим анимации резонансных кривых при различных значениях добротности Q колебательного контура.

Таким образом, сгенерированная сетка показана на рис. 8, анализ анимаций резонансных кривых – на рис. 17–19.

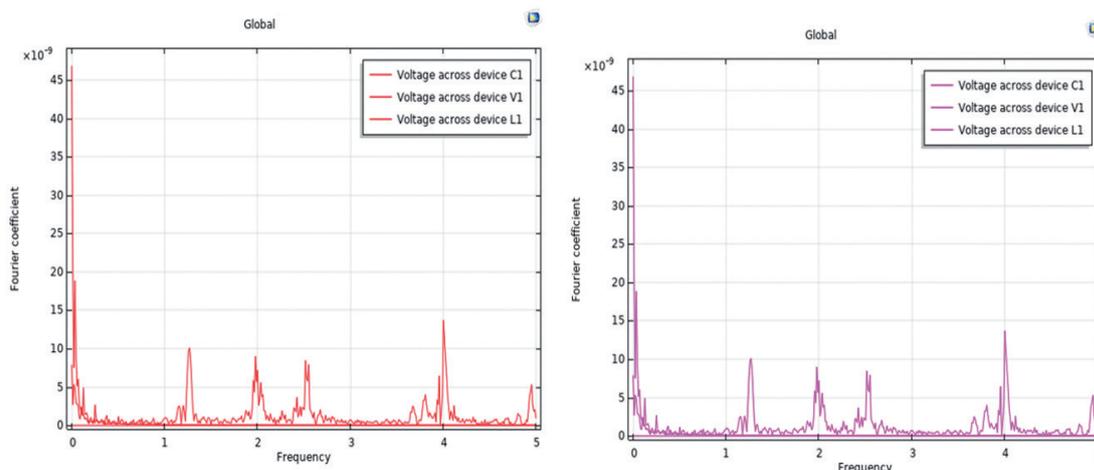


Рис. 17. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура $Q = 0,5$ (слева) и $Q = 1$ (справа)
Fig. 17. Animations of resonant curves with the tuned circuit Q -factor: $Q = 0.5$ (left) and $Q = 1$ (right)

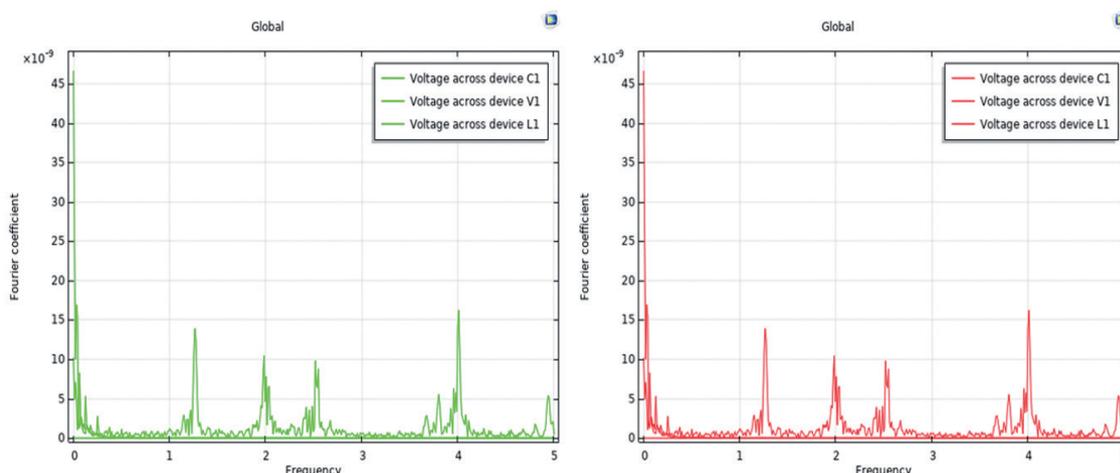


Рис. 18. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура $Q = 6$ (слева) и $Q = 12$ (справа)
Fig. 18. Animations of resonant curves with the tuned circuit Q -factor: $Q = 6$ (left) and $Q = 12$ (right)

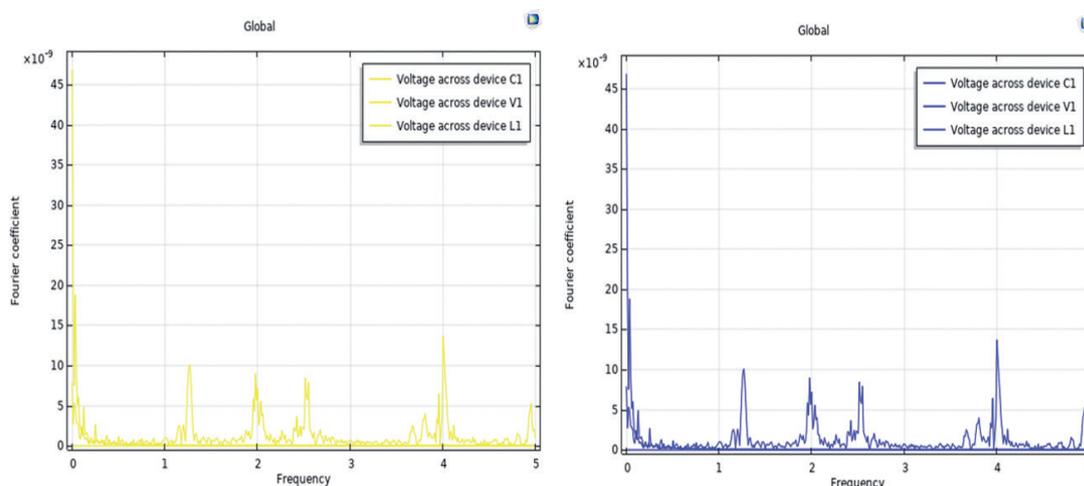


Рис. 19. Анимации резонансных кривых при добротности колебательного контура $Q = 0,1$ (слева) и $Q = 15$ (справа)
Fig. 19. Animations of resonant curves with the tuned circuit Q -factor: $Q = 0.1$ (left) and $Q = 15$ (right)

На основе полученных результатов можно констатировать, что цель исследования – конструирование реверсивной электрической машины переменного тока на базе четырехконтурного силового модуля ЭМВ НЧК достигнута на основе мультифизического моделирования в COMSOL Multiphysics.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В электромеханической системе 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 двухконтурного и четырехконтурного силового модуля ЭМВ НЧК при его трехфазном питании.

На основе функциональной модели с четырехконтурным силовым модулем выполнено конструирование электрической машины переменного тока вращательного движения из составных частей (силовых модулей) машины возвратно-поступательного движения (ЭМВ НЧК).

На основе мультифизического моделирования осуществлено корректное представление и визуализация картин колебательных движений якоря ЭМВ НЧК с двухконтурным силовым модулем, также сгенерирована конечно-элементная сетка модели, подтверждающая алгоритм моделирования и выбор исходных данных объекта.

На основе двухконтурной модели построена мультифизическая модель ЭМВ НЧК с четырехконтурным силовым модулем, отличающимся от предыдущих исходных модификаций вращательным типом движения по аналогии с синхронными машинами переменного тока.

Анимации и визуализация динамических процессов коррелируют с граничными условиями и теоретическими выкладками при определении активных и пассивных параметров электромеханической системы.

Актуальность задач и важность продолжения исследований подтверждены инновационными патентами РК и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ РосПатента РФ⁹⁻¹¹, опубликованных в 2025 г.

Список источников

1. Нитусов Ю.Е. Об одной схеме электромагнитного вибратора // Электричество. 1956. № 5. С. 81–84.
2. Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы многофракционных жидких продуктов // Электротехника. 2013. № 8. С. 48–51. EDN: QIRCRJ.
3. Туманов И.Е. Электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний. Вопросы теории, моделирования, разработки и прикладной значимости // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 1. С. 83–92. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_1_83. EDN: FKFEXX.
4. 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. Vol. 736. P. 97–102. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97>.
5. Nurimbetov A., Bekbayev A., Orynbayev S., Baibutanov B., Tumanov I., Keikimanova M. Optimization of windmill's layered composite blades to reduce aerodynamic noise and use in construction of "green" cities // International scientific Conference Urban civil Engineering and Municipal facilities (Spbucemf-2015): Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. P. 273–287. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.162>. EDN: UZYEBZ.
6. Каржавов Б.Н. Аппроксиматоры синусоидальных функций в электроприводах с управляемым моментом в исполнительных двигателях // Электричество. 2015. № 9. С. 39–47.
7. 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.

⁹Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025613484, Российская Федерация. Программа для построения, визуализации анализа физических процессов в преобразователе механических колебаний в электрический сигнал на выходе / И.Е. Туманов, К.В. Кенден; правообладатель Кенден Кара-Кыс Вадимовна. Дата поступления 04.02.2025; дата гос. регистрации в реестре 12.02.2025.

¹⁰Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025613576, Российская Федерация / И.Е. Туманов, К.В. Кенден; правообладатель Кенден Кара-Кыс Вадимовна. Дата поступления 04.02.2025; дата гос. регистрации в реестре 12.02.2025.

¹¹Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025613810, Российская Федерация / И.Е. Туманов, К.В. Кенден; правообладатель Кенден Кара-Кыс Вадимовна. Дата поступления 04.02.2025; дата гос. регистрации в реестре 17.02.2025.

8. Афанасьев А.И., Закаменных Ю.Г. Анализ энергозатрат резонансных вибротранспортных машин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 8. С. 107–109. EDN: KVXSWF.
9. Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Ибадуллаев М.И. Математическая модель электромагнитного вибратора с источником питания на основе инвертора // Вестник Московского энергетического института. 2022. № 1. С. 94–97. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-1-94-97>.
10. Ибадуллаев М.И., Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Назаров А.И. Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 1. С. 62–66. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-1-62-66>. EDN: GAVDKN.
11. Туманов И.Е. Параметрический синтез механической характеристики электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний на основе методов аналитической геометрии и его мультифизическое моделирование // Главный механик. 2023. № 11. С. 642–647.
12. Гаррис М., Лауренсон П., Стефенсон Дж. Системы относительных единиц в теории электрических машин / пер. с англ. В.Я. Беспалова. М.: Энергия, 1975. 120 с.
13. Ибадуллаев М.И., Тилляходжаев М.М., Абдуллаев Д.А. Определение структурных схем ЭВМ с автоматической настройкой на резонанс // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. 2011. № 1-2. С. 136–140.
14. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Режим доступа: http://lib.y-su.am/open_books/37978.pdf (дата обращения: 30.09.2024).
15. Красильников П.С., Байков А.Е., Чуркина Т.Е. Прикладные методы исследования нелинейных колебаний: монография. Ижевск: АНО «ИИКИ», 2015. 528 с. EDN: VEYXHP.
16. Боголюбов Н.Н., Крылов Н.М. Собрание научных трудов. Т. 2: Математика и нелинейная механика. Нелинейная механика / отв. ред. А.Д. Суханов. М.: Наука, 2005. 828 с.
17. Борисов А.В., Мамаев И.С. Динамика твердого тела: монография. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. EDN: TLWBKL.
18. Безгласный С.П. Управление движениями параметрического маятника // Известия Саратовского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2015. Т. 15. № 1. С. 67–73. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2015-15-1-67-73>. EDN: TMMCLN.
19. Bardin B.S. On nonlinear motions of a Hamiltonian system in the case of external resonance // Reports on Mathematical Physics. 2002. Vol. 49. No. 2-3. P. 133–142. [https://doi.org/10.1016/S0034-4877\(02\)80013-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4877(02)80013-1). EDN: LHGJDD.
20. Акуленко Л.Д., Нестеров С.В. Устойчивость равновесия маятника переменной длины ПММ // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. № 6. С. 893–902. EDN: KXXQTX.
21. Антипов В.И., Ефременков В.В., Руин А.А., Субботин К.Ю. Повышение эффективности работы вибрационных механизмов за счет возбуждения низкочастотного резонансного режима колебаний // Стекло и керамика. 2007. Т. 80. № 5. С. 13–16.

References

1. Nitsov Yu.E. On a circuit of an electromagnetic vibrator. *Elektrichestvo*. 1956;5:81-84. (In Russ.).
2. Tumanov I.E. Parametric electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations for systems for monitoring, measuring and multi-fraction liquid product mass batching. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2013;8:48-51. (In Russ.). EDN: QIRCRJ.
3. Tumanov I.E. Electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations. questions of theory, modeling, development and application significance. *Smart Electrical Engineering*. 2021;1:83-92. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_1_83. EDN: FKFEXX.
4. 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97>.
5. Nurimbetov A., Bekbayev A., Orynbayev S., Baibutanov B., Tumanov I., Keikimanova M. Optimization of windmill's layered composite blades to reduce aerodynamic noise and use in construction of "green" cities In: *International scientific Conference Urban civil Engineering and Municipal facilities (Spbucemf-2015): Procedia Engineering*. 2015;117:273-287. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.162>. EDN: UZYEBZ.
6. Karzhavov B.N. Approximators of sinusoidal functions in electric drives with controlled torque in actuators. *Elektrichestvo*. 2015;9:39-47. (In Russ.).
7. Nazarov A.I., Ibadullaev M.I., Tillyahodzhaev M.M. Structural diagram of an electromagnetic vibration exciter with amplitude-frequency control. *Problems of energy and sources saving*. 2016;3-4:55-59. (In Russ.).
8. Afanasyev A.I., Zakamennykh A.Yu. Analysis of power consumption by resonance vibrotransport machines. *Minerals and Mining Engineering*. 2008;8:107-109. (In Russ.). EDN: KVXSWF.
9. Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Ibadullaev M.I. Mathematical model of an electromagnetic vibrator with an inverter-based power source. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022;1:94-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-1-94-97>.
10. Ibadullaev M.I., Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Nazarov A.I. A resonant electromagnetic vibration exciter of oscillations with a feedback. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2020;1:62-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-1-62-66>. EDN: GAVDKN.

11. Tumanov I.E. Parametric synthesis of the mechanical characteristic of an electromagnetic exciter of low-frequency oscillations based on analytical geometry methods and its multiphysical modeling. *Chief Mechanical Engineer*. 2023;11:642-647. (In Russ.).
12. Harris M.R., Lawrenson P.J., Stefenson J.M. Per-unit systems: with special reference to electrical machines. Cambridge University Press, 1970. (Russ. ed.: *Sistemy odnositel'nyh edinic v teorii elektricheskikh mashin*. Moscow: Energiya; 1975, 120 p.)
13. Ibadullaev M.I., Tillyahodzhaev M.M., Abdullaev D.A. Determination of computer structural circuits with automatic resonance tuning. *Problems of energy and sources saving*. 2011;1-2:136-140. (In Russ.).
14. Bogolyubov N.N., Mitropol'skij Yu.A. Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations. Available from: http://lib.ysu.am/open_books/37978.pdf [Accessed 30th September 2024]. (In Russ.).
15. Krasil'nikov P.S., Bajkov A.E., Churkina T.E. *Applied methods for studying nonlinear oscillations*. Izhevsk: Izhevsk Institute of Computer Science; 2015, 528 p. (In Russ.). EDN: VEYXHP.
16. Bogolyubov N.N., Krylov N.M. Collection of Scientific Works. Vol. 2: Mathematics and Nonlinear Mechanics. Nonlinear Mechanics. Moscow: Nauka; 2005, 828 p. (In Russ.).
17. Borisov A.V., Mamaev I.S. *Solid body dynamics*. Izhevsk: *Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika*; 2001. 378 p. (In Russ.). EDN: TLWBKL.
18. Bezglasnyj S.P. On control of motion of a parametric pendulum. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2015;15(1):67-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2015-15-1-67-73>. EDN: TMMCLN.
19. Bardin B.S. On nonlinear motions of a Hamiltonian system in the case of external resonance. *Reports on Mathematical Physics*. 2002;49(2-3):133-142. [https://doi.org/10.1016/S0034-4877\(02\)80013-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4877(02)80013-1). EDN: LHGJDD.
20. Akulenko L.D., Nesterov S.V. The stability of the equilibrium of a pendulum of variable length. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2009;73(6):893-902. (In Russ.). EDN: KXXQTX.
21. Antipov V.I., Efremenkov V.V., Ruin A.A., Subbotin K.Yu. Improving vibration mechanisms efficiency by excitation of low-frequency resonant oscillation mode. *Glass and Ceramics*. 2007;80(5):13-16. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Туманов Исакул Елегенович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры теплофизики и технической физики,
Казахский национальный университет имени
Аль-Фараби,
050040, г. Алма-Ата, проспект Аль-Фараби, 71,
Казахстан
✉ isa.tumani56@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9874-5788>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Isakul E. Tumanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Thermal
Physics and Technical Physics,
Al-Farabi Kazakh National University,
71 Al-Farabi Ave., Almaty 050040,
Republic of Kazakhstan
✉ isa.tumani56@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9874-5788>

Заявленный вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Author contribution

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию г.; одобрена после рецензирования 25.12.2024 г.; принята к публикации 21.02.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 26.11.2024; approved after reviewing 25.12.2024; accepted for publication 21.02.2025.