

И.М. Карпова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ДВИЖУЩИМИСЯ КОНТАКТАМИ

В работе рассмотрена процедура создания виртуальной модели электротехнического устройства с движущейся пластиной. Полевая модель устройства была реализована в пакете ELCUT. Связь с внешней средой (виртуальным окружением) осуществлена средствами Microsoft Excel. Рассмотренный пример может послужить основой для виртуальной модели высоковольтных выключателей, разъединителей и других объектов системы электроснабжения.

Ключевые слова: цифровой двойник, виртуальная модель, движение пластины, электромагнитное поле.

Цифровая трансформация объектов электроснабжения в настоящее время является инструментом повышения надежности и эффективности используемого оборудования, способствует снижению затрат на его техническое обслуживание. Прежде всего процесс цифровизации систем электроснабжения направлен на внедрение современных устройств автоматизации, ведущих непрерывный мониторинг параметров электрической энергии, что обеспечивает накопление информации о потреблении энергии, о факторах, влияющих на изменение нагрузки, а также их взаимном воздействии. Накопленные статистические данные могут быть использованы для рационального распределения нагрузок в энергосистеме, повышения качества электроэнергии и устойчивости электроснабжения ответственных потребителей.

Знание о текущем состоянии оборудования позволяет проводить его обслуживание, руководствуясь не регламентом, а реальной ситуацией, тем самым, своевременно предотвращать аварии, вызываемые отказом этого оборудования.

Вместе с тем, цифровая трансформация подразумевает не только расширение мониторинга устройств электроснабжения и построение на его основе системы оптимального управления. Важной составляющей процесса цифровизации является разработка цифровых двойников объектов электроснабжения, т.е. динамически изменяющейся модели объекта,

имитирующей его работу. Моделирование работы цифрового двойника в различных ситуациях, в том числе аварийных, позволяет спрогнозировать поведение физического прототипа в условиях реальной эксплуатации.

Разработка цифрового двойника физического объекта включает в себя создание адекватной цифровой модели этого изделия, с необходимой степенью точности описывающей происходящие в нем физические явления, и виртуальной модели окружающей этот объект среды [1].

Для моделирования «окружения» рассматриваемого объекта в настоящее время наиболее распространение получили такие программные комплексы, как PSCAD, EMTP, Simulink, SimInTech. Цифровая модель физического объекта тоже может быть построена в этих программных комплексах, однако для более полного описания физических процессов имеет смысл обратиться к специализированным пакетам полевого моделирования, таким как ELCUT или COMSOL MULTIPHYSICS, в которых реализована возможность мультифизического анализа, т.е. совместного решения уравнений из разных областей физики. Эти пакеты программ содержат полный набор математических формулировок для расчета различных видов электромагнитного поля (статических, стационарных, гармонических, квазистационарных и нестационарных) в проводящих и непроводящих средах, а также функционал для решения тепловых и механических задач. Реализован механизм сопряжения полевой модели с уравнениями электрической цепи. Принимая во внимание, что большинство подобных программных продуктов разработаны западными компаниями и подвержены санкционным рискам, имеет смысл обратиться к использованию отечественных программных комплексов, одним из представителей которых является ELCUT [2].

Помимо вышеперечисленных функций и удобного графического представления для описания физики процесса ELCUT имеет программный интерфейс, обеспечивающий взаимодействие между ядром ELCUT и такими программами, как Microsoft Office, MATLAB, Simulink, что позволяет внедрить полевую модель отдельного объекта в виртуальную окружающую среду, с сохранением всех графических возможностей анализа результатов, предоставляемых ELCUT [3].

Для демонстрации возможностей программного интерфейса в данной работе рассмотрен процесс ускорения тонкой алюминиевой пластины в магнитном поле, создаваемом спиральным индуктором при протекании по нему импульсного тока. Выбор этого примера обусловлен следующими причинами: многие объекты в системах электроснабжения имеют подвижные контакты, управляемые магнитным полем; между полевой электромагнитной моделью и процессом движения существует интуитивно простая для понимания связь. Рассмотренный пример может послужить основой для разработки виртуальных моделей высоковольтных

выключателей, разъединителей и других объектов системы электроснабжения.

Протекание по катушке-индуктору импульсного тока создает импульсное магнитное поле, которое индуцирует вихревые токи в проводящем кольце, расположенном изначально на некотором расстоянии над катушкой (рис. 1). Взаимодействие магнитного поля индуктора с током в кольце создает механическую силу F , заставляющую его двигаться с ускорением в направлении оси Z . По мере движения изменяется ток в катушке, что в совокупности с изменением положения кольца приводит к изменению механической силы.

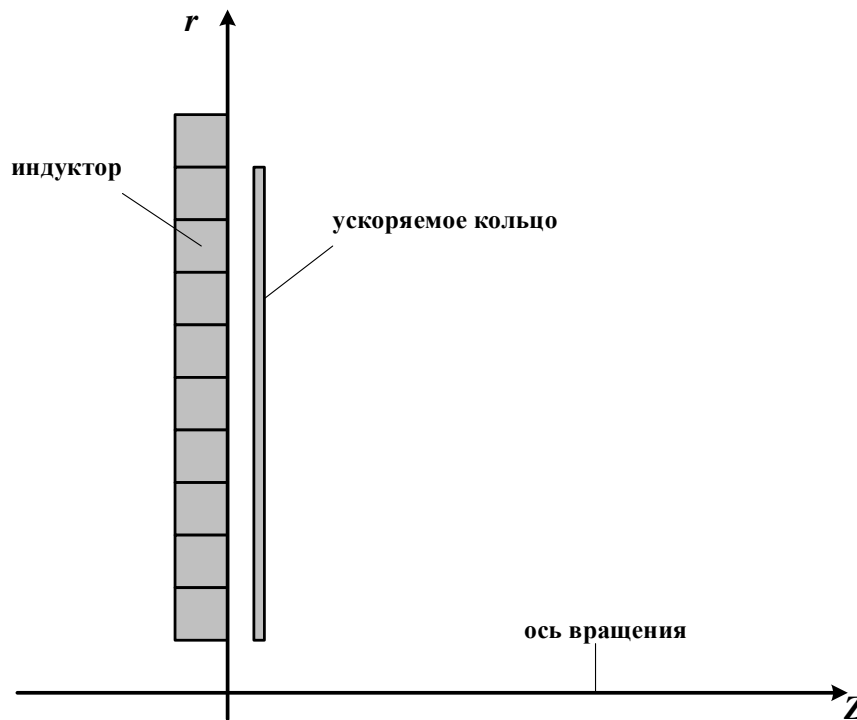


Рис.1 Геометрическая модель задачи

Изменение геометрии расчетной области, связанное с перемещением ускоряемого кольца, требует решения в ELCUT последовательности задач с фиксированной геометрией. При этом управление движением осуществляется через программный интерфейс. В качестве внешней программы использовался Microsoft Excel.

В ELCUT создается двумерная осесимметричная задача нестационарного магнитного поля, сформулированная относительно азимутальной составляющей векторного магнитного потенциала $A=A_\theta$:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = -j_{\text{стор}}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость, γ – удельная электропроводность, $j_{\text{стор}}$ – плотность стороннего тока (источника магнитного поля).

Ток в индукторе описывается выражением:

$$i = I_m e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (2)$$

где I_m – амплитудное значение тока, δ и ω – декремент затухания и круговая частота соответственно.

Процесс движения пластины под действием механической силы описывается простейшими дифференциальными уравнениями:

$$m \frac{dV}{dt} = F; \quad \frac{dz}{dt} = V, \quad (3)$$

где m – масса ускоряемого кольца; F – осевая компонента электромагнитной силы, действующей на кольцо; v , z – осевая скорость и координата кольца.

Решение уравнений (3) проводилось в Microsoft Excel, взаимодействие которого с ELCUT для вычисления силы на каждом временном шаге осуществлялось через программный интерфейс (рис.2).

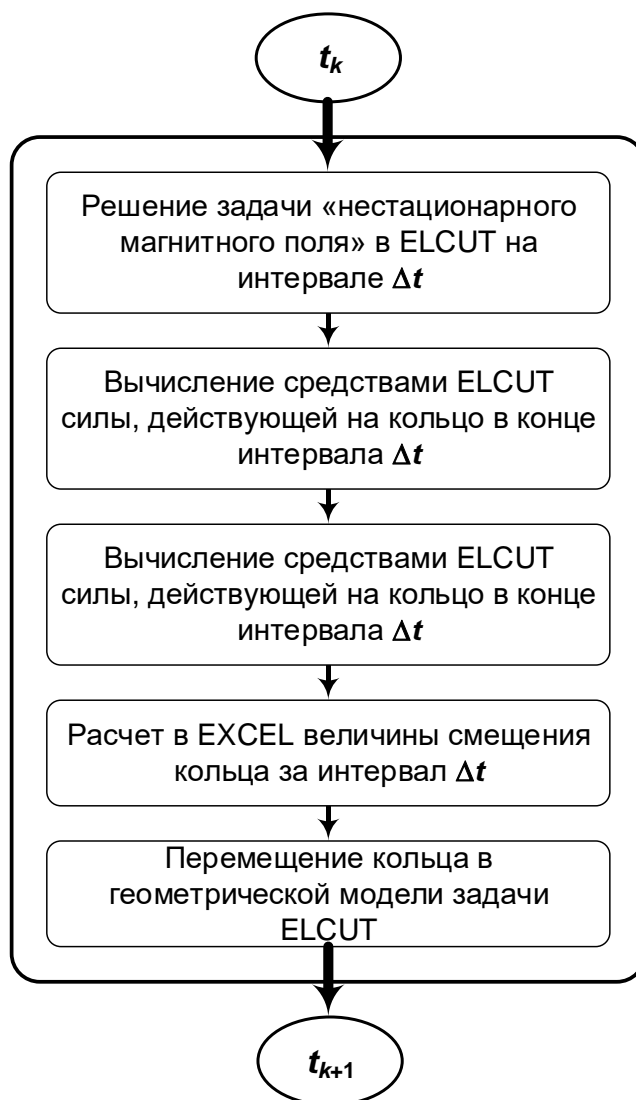


Рис.2 Алгоритм решения задачи на k -ом временном интервале

Для верификации результатов описанного вычислительного эксперимента было проведено сравнение с результатами расчета в программе, построенной на других вычислительных методах [4]. Полученные данные позволяют сделать вывод, что предложенная в работе методика дает адекватную картину электромагнитного взаимодействия и может быть использована для разработки виртуальных моделей объектов электроснабжения, в которых движение элементов регулируется магнитным полем.

Библиографический список

1. Шевченко Д. В. Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 2. С. 91 – 99.
2. Ким К.К., Карпова И.М. Электротехнические и тепловые расчеты с применением пакета ELCUT // В сборнике: Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта. Межвузовский тематический сборник научных трудов. Омский государственный университет путей сообщения; под редакцией А. А. Кузнецова. Омск, 2011. С. 10-15.
3. Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Численное моделирование электромагнитных полей: мультифизические задачи, инструментарий и обучение // Электричество. 2019. №6. С. 51–58.
4. Карпова И.М., Нестерцов И.А. Расчет индукционного ускорителя плоских тел на основе спирального индуктора. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018614009, 27.03.2018.