

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ

М. Ю. Николаев , А. А. Татевосян

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

 mulp@yandex.ru

Использование магнитно-импульсного устройства преобразования электрической энергии в полезную механическую высокоскоростную работу имеет большие перспективы в применении в промышленности. Обладая высоким быстродействием (1–5 мс) и низким потреблением (не более 500 Вт · ч), такие установки позволяют за счет электромагнитной силы взаимного отталкивания якоря и индуктора достигать высокого экономического эффекта. При этом процесс возникновения вихревых токов в якоре, который и является основополагающим процессом, изучен слабо.

Целью данного исследования является изучение процессов возникновения магнитных полей и вихревых токов в якоре, измерение их напряженностей, что в итоге приводит к возникновению силы обратного воздействия на порождающее их электромагнитное поле индуктора. Благодаря методам моделирования импульсного электромагнитного взаимодействия, рассмотренным в данной статье, представляется возможным в дальнейшем регулировать на натурных образцах импульс тока определенной амплитуды, который и создает токи Фуко в якоре. Это и создает предпосылки для нарушения адгезионных связей между слоями очищаемого материала и поверхности в пределах зоны упругой деформации, что является наиболее актуальным способом применения магнитно-импульсного устройства в промышленности.

Таким образом, в основе математического аппарата моделирования физических процессов в программном комплексе ELCUT 6.0 лежит метод узловых потенциалов для магнитных и электрических полей. Применение данного метода позволяет с достаточной степенью точности описывать распределение магнитного поля и плотности вихревых токов в якоре на всех этапах импульсного воздействия. Полученные результаты моделирования создают основу для дальнейшей оптимизации конструкции магнитно-импульсного устройства и обоснованного выбора параметров импульса тока, обеспечивающих максимальную эффективность нарушения адгезионных связей при минимальных энергозатратах.

Ключевые слова: электроимпульсные системы, магнитное поле, вектор магнитной индукции, электромагнитное взаимодействие, моделирование электромагнитных полей, токи Фуко, импульсное электромагнитное поле

Для цитирования: Николаев М. Ю., Татевосян А. А. Моделирование электромагнитных полей взаимодействия в электроимпульсных системах. *Омский научный вестник*. 2026. № 3 (199). С. 88–96. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-88-96>. EDN: ZOIEEP.



© Николаев М. Ю., Татевосян А. А., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELING OF ELECTROMAGNETIC INTERACTION FIELDS IN PULSED POWER SYSTEMS

M. Yu. Nikolaev✉, A. A. Tatevosyan

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

✉ mulp@yandex.ru

ОМСКИЙ НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК № 3 (199) 2026
OMSK SCIENTIFIC BULLETIN NO. 3 (199) 2026

The use of a magnetic pulse device for converting electrical energy into useful mechanical high-speed operation has great prospects for industrial applications. With high speed (1–5 ms) and low consumption (no more than 500 Wh) such installations allow achieving a high economic effect due to the electromagnetic force of mutual repulsion of the armature and the inductor. At the same time, the process of eddy currents in the armature, which is the fundamental process, has been poorly studied.

The aim of the research is to study the processes of magnetic field and eddy current generation in the armature, measure their intensities, which ultimately leads to the emergence of a back-action force on the inducer's electromagnetic field that generated them. Thanks to the methods for modeling pulsed electromagnetic interaction considered in this article, it allows further regulating on full-scale samples a current pulse of certain amplitude, which creates Foucault currents (eddy currents) in the armature. It creates prerequisites for disrupting the adhesive bonds between the layers of the material being cleaned and the surface within the limits of elastic deformation zone, which constitutes the most relevant industrial application of a magnetic-pulse device.

Thus, the mathematical framework for modeling physical processes in the ELCUT 6.0 Professional Software Package is based on the method of nodal potentials for magnetic and electric fields. The use of this method allows describing the distribution of the magnetic field and eddy current density in the armature with sufficient accuracy at all stages of pulsed action. The obtained simulation results provide a basis for further optimization of the design of the magnetic-pulse device and the well-reasoned selection of current pulse parameters that ensure maximum efficiency in disrupting adhesive bonds with minimal energy consumption.

Keywords: electric pulse systems, magnetic field, magnetic induction vector, electromagnetic interaction, modeling of electromagnetic fields, Foucault currents, pulsed electromagnetic field

For citation: Nikolaev M. Yu., Tatevosyan A. A. Modeling of electromagnetic interaction fields in pulsed power systems. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):88–96. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-88-96>. EDN: ZOIEEP. (In Russ.).



© Nikolaev M. Yu., Tatevosyan A. A., 2026.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью углубленного анализа механического взаимодействия в паре «индуктор—якорь», ключевым результатом которого является высокоскоростная импульсная деформация на соприкасающихся с якорем поверхностях.

Цель исследования — определение оптимальных конструктивно-технологических параметров системы (геометрии, материала, индуктивности индуктора и якоря) на основе комплексного анализа взаимодействия их электромагнитных полей. В свою очередь анализ направлен на максимизацию отталкивающей электродинамической силы путем математического моделирования физических процессов в программном комплексе ELCUT 6.0 (Professional).

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются электроимпульсные системы различных геометрических размеров, конфигураций, обладающие различными электромагнитными характеристиками, а также зарядные и емкостные системы. Основным изучаемый процесс — импульсное силовое взаимодействие между индуктором и проводящим якорем, возника-

ющее вследствие динамического отклика вихревых токов на разрядный ток катушки [1–6].

До настоящего времени процессы наведения вихревых токов в результате воздействия нарастающего или убывающего (изменяющегося) электромагнитного поля, вызванного разрядом конденсатора на индуктивность катушки индуктора, изучены достаточно слабо и тем не менее применяются в различных областях электротехники. Непосредственно сам проводящий материал (различные виды металлов) со своей ярко выраженной кристаллической основой образует замкнутые контуры, в которых по закону электромагнитной индукции и протекают эти самые вихревые токи (токи Фуко), образующие свои единичные электромагнитные поля, препятствующие нарастанию или убыванию порождающего их электромагнитного поля индуктора. Результатом указанного взаимодействия является упругая деформация целевой поверхности (например, в процессе очистки). Эффект высокоскоростной упругой деформации поверхностей, на которые направлено взаимодействие, не приводит к разрушению их кристаллических решеток, но способствует разрушению адгезии поверхности и веществ, подлежащих очистке. Работа си-



Рис. 1. Силовые элементы электроимпульсной системы взаимодействия:
а) индуктор; б) высоковольтный конденсатор

Fig. 1. Power elements of the electric pulse interaction system:
a) inductor; б) high-voltage capacitor

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

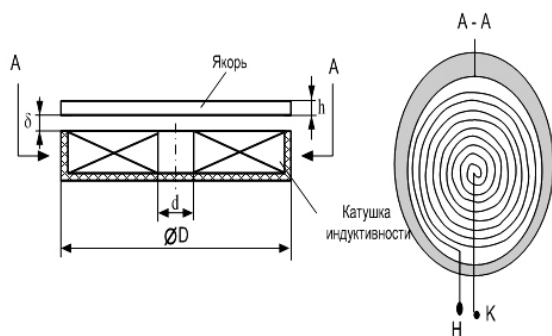


Рис. 2. Исполнительное устройство электроимпульсной системы

Fig. 2. Actuator of the electric pulse system

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

системы реализует принцип концентрации энергии во времени. Длительная фаза накопления энергии в ёмкостном накопителе (порядка 10^3 с) сменяется её сверхбыстрым (10^{-4} – 10^{-6} с) преобразованием в импульс механического воздействия, что обеспечивает усиление мощности до 10^6 и более, моделируя эффект импульсного ударного воздействия.

Действительно, процесс наведения токов Фуко в якоре, согласно результату моделирования и натурным экспериментом на экспериментальной установке очистки от наледи, происходит практически мгновенно, не позволяя механическому напряжению превысить пороговое значение начала процесса текучести (вида деформации кристаллической решетки). Таким образом, можно предположить, что разрушение адгезионного слоя между поверхностью материала, на который воздействует механически якорь, и очищаемым материалом вызвано волновыми процессами, которые были образованы вследствие механического воздействия якоря на поверхность воздействия. Следует отметить, что это только предположение и подтверждающих его исследований не проводилось.

Методом исследования выступило компьютерное моделирование нестационарного электромагнитного процесса в связке с электрической цепью, проведенное в среде ELCUT 6.0 (профессиональная

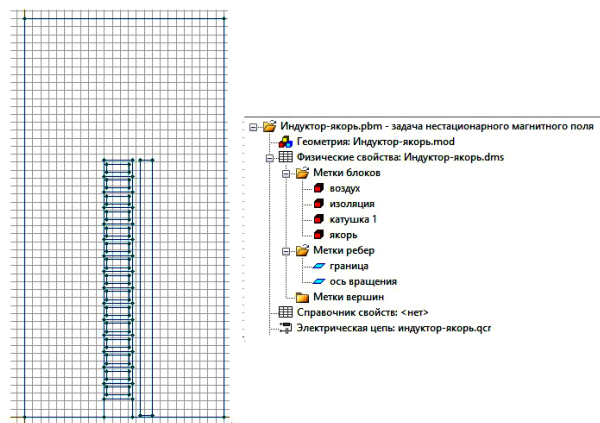


Рис. 3. Формирование и расчет магнитной системы взаимодействия индуктора и якоря

Fig. 3. Formation and calculation of the magnetic interaction system of the inductor and the armature

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

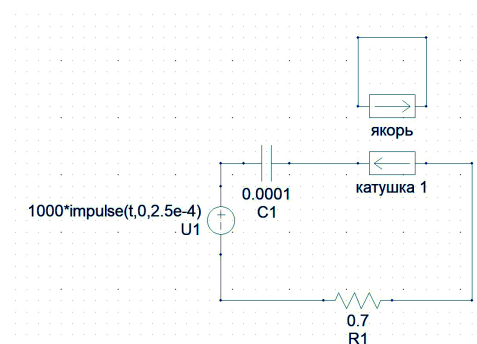


Рис. 4. Электрическая схема взаимодействия индуктора (катушка) и якоря с параметрами элементов

Fig. 4. Electrical circuit of the interaction of the inductor (coil) and the armature with the elements parameters

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

версия). Данный программно-аналитический комплекс, основанный на методе конечных элементов узлов электромагнитных полей, подходит для решения такого типа аналитических задач, позволяет наглядно с помощью цветовой шкалы определить направление векторов силовых линий и значения напряженностей исследуемых полей. Кроме того, программа позволяет точно воспроизводить параметры экспериментальных физических установок, а также все параметры среды взаимодействия в системе «индуктор—якорь» при построении и функционировании электрической цепи. При этом все параметры и характеристики электрической цепи схемы замещения отражаются на системе взаимодействия «индуктор—якорь» с высокой метрологической точностью. Далее была построена модель системы взаимодействия «индуктор—якорь» с использованием реальных параметров физической модели опытного образца генератора. Силовые элементы электроимпульсной системы взаимодействия показаны на рис. 1.

Эскизная модель исследуемой магнитной системы «индуктор—якорь» представлена на рис. 2. Основные этапы моделирования процесса взаимодействия между плоским индуктором и пластиной якоря, выполненные в среде ELCUT 6.0, иллюстрируются на рис. 3 и 4.

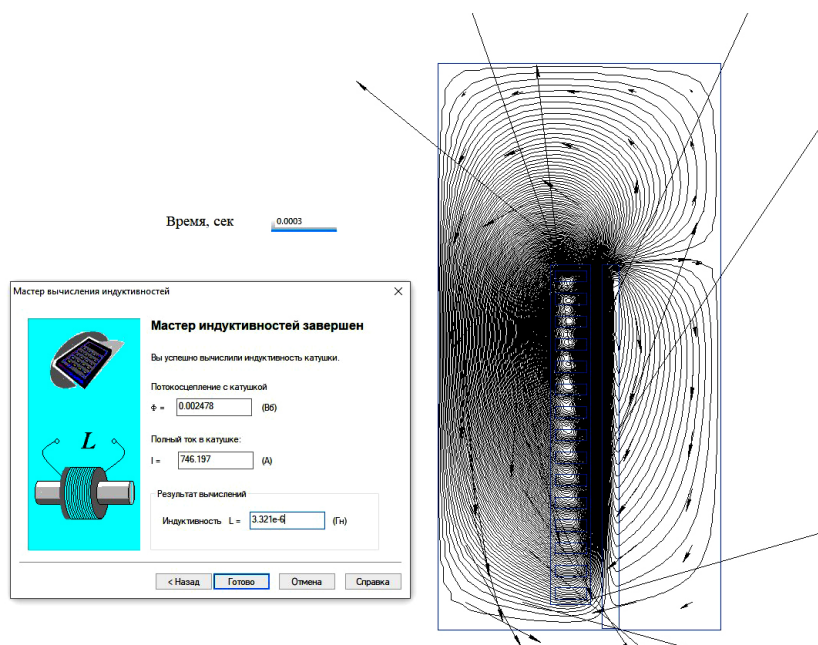


Рис. 5. Максимальная глубина проникновения взаимных полей взаимодействия индуктора и якоря

Fig. 5. Maximum penetration depth of mutual fields of interaction of the inductor and the armature

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

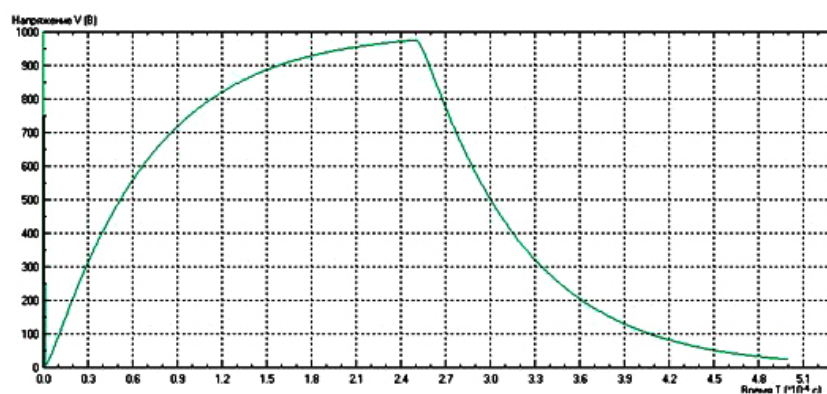


Рис. 6. Разряд конденсатора на индуктор

Fig. 6. Discharge of the capacitor to the inductor

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Научная новизна, представленная в данной статье, состоит в том, что до настоящего времени недостаточно изучена природа и описаны процессы возникновения вихревых токов Фуко в якоре, их глубина проникновения, интенсивность и мощность созданного ими электромагнитного поля. Их программное моделирование, представленное ниже, позволяет приблизиться к достижению решения этой задачи.

Результаты и их обсуждение

Решение связанной цепно-полевой задачи системы взаимодействия «плоский индуктор — плоский якорь» при обратной силе взаимодействия полей вихревых токов в пластине якоря на быстро возрастающее поле плоской катушки индуктора рассмотрим в комплексе программ ELCUT 6.0 Professional. Ниже представлены исходные данные модели, которые соответствуют физическому образцу электроимпульсной установки, используемой в натурных испытаниях и исследованиях.

Индуктор выполнен в виде спирали из 20 последовательно соединенных витков сечением 5×1,5 мм. Ось симметрии модели, совпадающая с её нижней границей, использовалась для построения расчётной области, представляющей половину конструкции. Геометрические параметры якоря составляют 41,3 мм, а воздушный зазор между активными элементами системы задан равным 1 мм. В ходе эксперимента получен ряд ключевых зависимостей, включая динамику тока в индукторе при использовании якостей из различных материалов; изменение напряжения на ёмкостном накопителе; распределение плотности тока в проводящих элементах системы (индукторе и якоре). На основании анализа результатов моделирования определена максимальная глубина проникновения взаимоиндукционных полей, графически представленная на рис. 5. Все геометрические и параметрические параметры модели исследования взяты из существующей физически экспериментальной установки, которая успешно функционирует для очистки от наледи

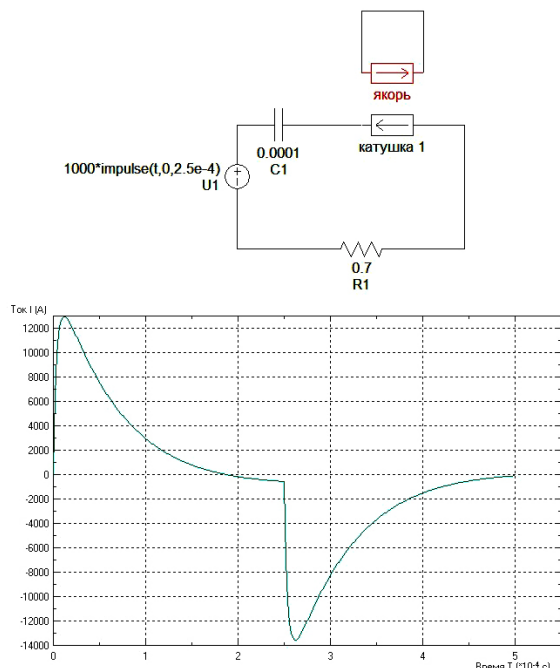


Рис. 7. Временная характеристика пиковых значений плотности вихревых токов в якоре
Fig. 7. Temporal features of peak values of eddy current density in the armature
Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

карнизов наклонных кровель ввиду образования опасных ледяных образований, которые необходимо контролируемо очищать. Именно в ходе разработки указанного опытного образца были получены оптимальные инженерные решения по материалу обмоток индуктора, его форме; рассчитана электрическая принципиальная схема и ее параметры; выбран материал, форма и толщина пластины якоря.

В ходе работы над проектированием опытного образца были полностью разобраны все физические процессы, протекающие в импульсной системе «плоский индуктор — плоский якорь».

Результаты решения сопряженной задачи нестационарного магнитного поля с учётом внешней электрической цепи дают количественную оценку эффективности и полезной работы поля, создаваемого индуктором [7–15]. Данный подход позволяет установить прямую корреляцию между параметрами цепи, конфигурацией генерируемого поля и результирующей картиной распределения магнитной индукции в плоском якоре. В процессе решения были получены результаты мгновенных максимальных значений и пика магнитной индукции, создаваемых плоским индуктором при разряде высоковольтного конденсатора при максимальном заряде в 1 кВ. Следует понимать, что именно высокое напряжение вместе с явлением резонанса системы «емкость — индуктивность» создает эффект кратного усиления мощности электромагнитного взаимодействия. Все временные характеристики параметров колебательного контура в резонансе электрической системы «конденсатор — индуктор» указывают на пиковые значения образования вихревых токов в плоском якоре. Именно это сочетание параметров позволяет создать максимальные токи Фуко в якоре, обеспечить максимальную силу противодействия нарастающему нестационарному полю индуктора и, самое главное, — вызвать усиление мощности до 10^6 и более за счет резонансных явлений, моделируя механическое ускорение и создавая эффект импульсного ударного воздействия на объект очистки, а также обеспечивая поступательное движение с ускорением для других целей. Временная характеристика разряда конденсатора на индуктор представлена на рис. 6.

В рамках исследования было проведено исследование с целью зафиксировать время наиболее эффективного взаимодействия системы «индуктор — якорь», проявляющееся в силе $F_{эм}$ отталкивания

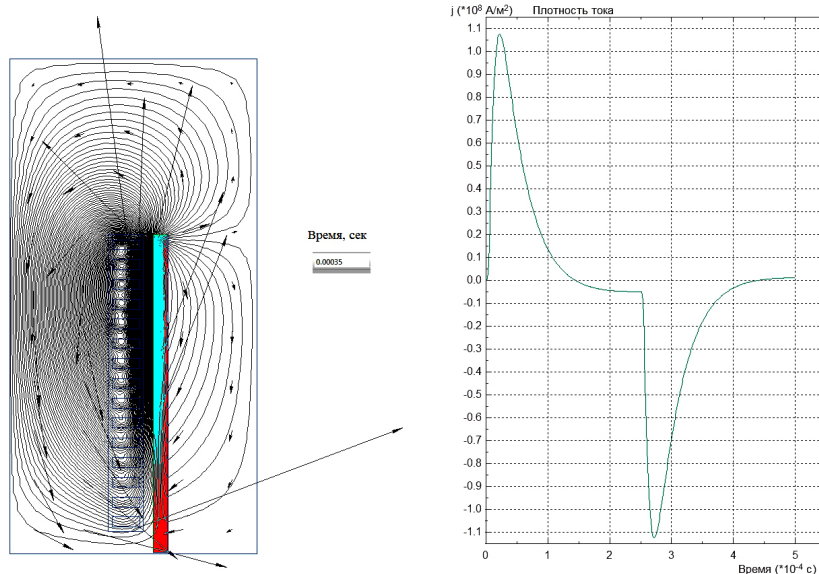


Рис. 8. Временная характеристика пиковых значений плотности вихревых токов в якоре совместно с картиной магнитных линий взаимодействия полей системы «индуктор — якорь»
Fig. 8. Temporal features of the peak eddy current density in the armature, combined with the magnetic flux pattern (magnetic field lines) of the interaction fields in the inductor and armature system

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

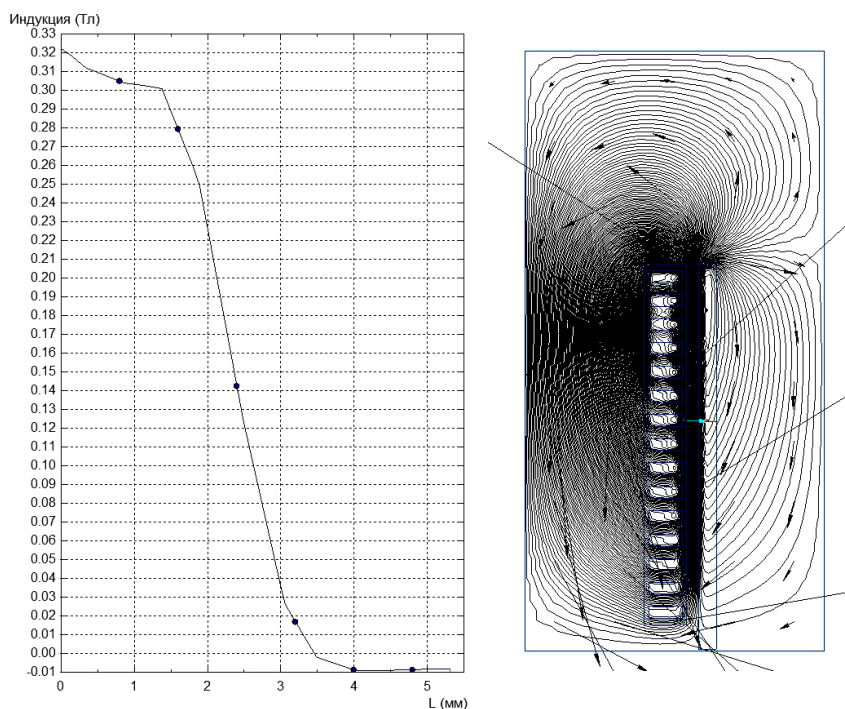


Рис. 9. Исследование неравномерности проникновения магнитного поля индуктора в токопроводящую пластину якоря в корреляции с индукцией от вихревых токов якоря

Fig. 9. Study of the non-uniformity of inductor magnetic field penetration into a conductive armature plate in correlation with the magnetic flux density induced by the armature's eddy currents

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

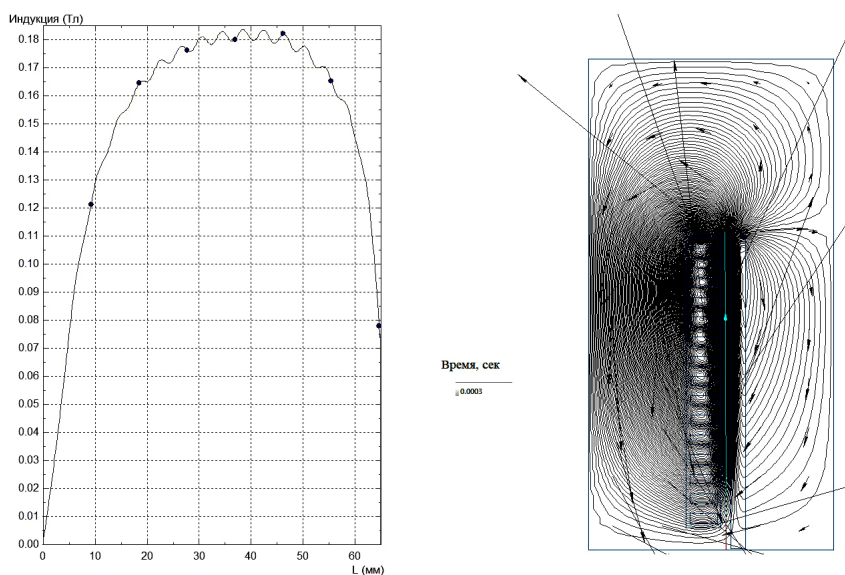


Рис. 10. Исследование неравномерности проникновения магнитного поля индуктора в токопроводящую пластину якоря в корреляции с индукцией поля индуктора

Fig. 10. Study of the non-uniformity of inductor magnetic field penetration into the conductive armature plate in correlation with the inductor's magnetic flux density

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

пластины от индуктора в своем пиковом значении в соответствии с законом Ампера (правило левой руки). Время составило $2,62 \cdot 10^{-4}$ с. Исследование основано на временной характеристике пиковых значений плотности вихревых токов в якоре, наглядно представленных на рис. 7 и 8. Более того, такое небольшое время отклика возникновения силы отталкивания в моменте полезной мощности применения этого явления не разрушает кристаллическую решетку материала, на который воздействует

якорь. Отрицательные значения показаний определяются из закона направления индуцированной электродвижущей силы по правилу Э. Х. Ленца. Из этого следует, что в зазоре между плоским индуктором (катушкой) и токопроводящей пластиной (якорем) преобладает тангенциальная составляющая вектора напряженности магнитного поля к поверхности токопроводящей плоской пластины, что подтверждается взаимодействием полей индуктора и якоря и порождает силу отталкивания. Образовав-

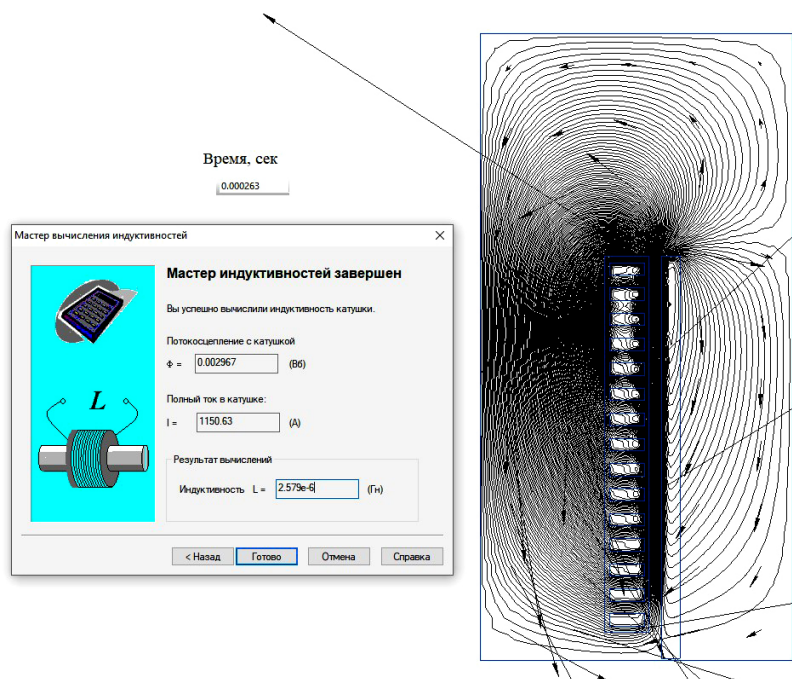


Рис. 11. Максимальная глубина проникновения взаимных полей взаимодействия индуктора и якоря в пике взаимодействия системы «плоский индуктор–плоский якорь»

Fig. 11. Maximum penetration depth of the mutual interaction fields of the inductor and armature at the interaction peak in the "flat inductor–flat armature" system

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

шаяся механическая энергия и является следствием электромагнитного взаимодействия системы, совершая полезную работу при различных применениях рассматриваемой установки. Главным фактором является время возникновения и совершения работы по перемещению, то есть время отклика, или быстродействие. Указанное быстродействие не позволяет нарушиться связям атомов структуры поверхности воздействия, создавая только волновые процессы механических упругих деформаций между налипшим материалом и непосредственно поверхностью воздействия.

На рис. 9–11 представлены результаты исследования неравномерности проникновения магнитного поля индуктора в токопроводящую пластину якоря. Максимальная глубина проникновения показана в черно-белой палитре с изменяющейся контрастностью цвета. Более того, исследование позволяет определять области в якоря с максимальной амплитудой плотности тока, которая является причиной возникновения токов Фуко, запускающих процесс взаимодействия. Плотность тока косвенно указывает на количество независимых замкнутых контуров, по которым и протекают образовавшиеся вихревые токи.

При отсутствии ферромагнитных сред в системе взаимодействия «плоский индуктор–плоский якорь» можно принять допущение, что индуктивность индуктора в процессе разряда остается величиной постоянной. Результаты численного моделирования нестационарного магнитного поля, выполненного в программном комплексе ELCUT 6.0 Professional для процесса разряда индуктора, подтверждают выдвинутую гипотезу.

Выводы

На основе результатов моделирования были получены следующие выводы:

1. Применение комплекса программ ELCUT 6.0 Professional для решения сопряженной задачи нестационарного электромагнитного поля и электрической цепи электроимпульсной установки позволяет достоверно воспроизвести динамику взаимодействия магнитных полей в системе «плоский индуктор–плоский якорь». Данный подход дает возможность определить временные характеристики процесса, которые проявляются в формировании электромагнитной силы $F_{эм}$ отталкивания пластины от индуктора, достигающей пиковых значений в соответствии с законом Ампера [1, 2]. Направление этой силы определено по правилу Ленца, и ее вектор соответствует назначению установки при максимальной силе воздействия и быстродействии возникновения.

2. В результате моделирования определено время максимальной силы $F_{эм}$ отталкивания пластины от индуктора в своем пиковом значении. Время составило $2,62 \cdot 10^{-4}$ с, что также подтверждается временной характеристикой плотности вихревых токов, образованных в плоском якоря в результате воздействия на него импульсного магнитного поля плоского индуктора. Благодаря быстродействию вместе с явлением резонанса обеспечивается эффект кратного усиления мощности преобразования энергии электромагнитного поля в силу отталкивания якоря.

3. Результаты проведенного моделирования оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели устройств, принцип работы которых основан на взаимодействии магнитного поля индуктора с вихревыми токами, наводимыми в якоря. Такое небольшое время отклика возникновения силы отталкивания, составляющее $2,62 \cdot 10^{-4}$ с, в момент полезной мощности применения этого явления не разрушает кристаллическую решетку материала в соответствии с теорией ма-

териаловедения, на который воздействует якорь. Эффективность применения рассмотренного явления позволяет разрабатывать новые методы проектирования ударных установок для нужд промышленности, энергетики и жилищно-коммунального хозяйства. Стоит также обратить внимание на коэффициент полезного действия системы взаимодействия «индуктор—якорь». Так как для создания магнитного поля индуктором применяется высоковольтный конденсатор, то создается ряд эффективных преимуществ для рассматриваемого вида взаимодействия по сравнению с другими способами обеспечения взаимодействия.

При правильно подобранных параметрах элементов системы имеет место явление резонанса и, как следствие, усиление полезной мощности. При этом достигается высокая энергетическая эффективность за счет малого времени и небольшой энергии, необходимой для заряда высоковольтного конденсатора. Используемое для заряда высоковольтного конденсатора устройство также имеет уникальную разработанную схемотехнику, которая позволяет поддерживать высокую энергетическую эффективность.

Заключение

Экспериментальные исследования сопряжены со сложностью измерения токов Фуко в движущемся якоре, поэтому ключевое внимание уделялось методам и способам моделирования и расчета, а также оценке неопределенности измерений параметров, позволяющих представить полную картину электродинамического процесса. Ключевой особенностью систем типа «плоский индуктор—плоский якорь» является реализация принципа концентрации энергии во времени, а также высокой энергетической эффективности системы взаимодействия. Относительно быстрого действия времени возникновения силы отталкивания якоря, длительный этап аккумуляции энергии в накопителе сменяется ее высвобождением в сверхкоротком интервале, что обеспечивает достижение экстремальных значений импульсного механического воздействия на поверхность.

Однако это не приводит к разрушениям атомных связей кристаллической решетки поверхности, на которую направлено механическое воздействие якоря, а вызывает только волновые процессы упругой деформации по поверхности, что позволяет разрушить адгезионные связи на ней. Рабочее напряжение на емкостном накопителе в таких системах может достигать 5 кВ и более. По принципу действия данные электроимпульсные системы классифицируются как устройства ударного типа, что позволяет их использовать для решения различных задач в промышленности, энергетике и даже в жилищно-коммунальном комплексе.

Сравнительный анализ с альтернативными технологиями (вибрационными, электромагнитными или пневматическими ударными механизмами) демонстрирует их превосходство как по энергетической эффективности технологических операций (например, очистки), так и по коэффициенту полезного действия преобразования электрической энергии в механическую работу. Данное исследование позволяет подтвердить натурные эксперименты, уточнить геометрические и электрические параметры установки системы взаимодействия «индуктор—якорь».

Список источников / References

1. Верещагин И. П., Смагин К. А., Чекалов А. В. [и др.]. Анализ процессов очистки отходящих газов в пластинчатых электрофильтрах с учетом вторичного уноса частиц с электродами // *Электротехника*. 2017. № 8. С. 57–65. EDN: YUTIMV.
2. Vereshchagin I. P., Smagin K. A., Chekalov A. V. [et al.]. Analiz protsessov oчитки otkhodyashchikh gazov v plastinchatykh elektrofiltakh s uchetom vtorichnogo unosa chastits s elektrodov. *Elektrotehnika*. 2017;8:57–65. EDN: YUTIMV. (In Russ.).
3. Rzaeva S. V. Features of Electrodeless Electrochemical Reactions. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2023;59:590–594. <https://doi.org/10.3103/s1068375523050150>. EDN: DGNJER.
4. Ахмедов Э. Н., Сафиев С. Э., Рзаева С. В. Инновационные методы электроимпульсной очистки химических жидкостей для синтеза полимерных материалов с заданными свойствами // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2025. № 1 (430). С. 204–217. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2025.01.204-217>. EDN: CEMFRZ.
5. Ahmedov E. N., Safiyev S. E., Rzaeva S. V. Innovative methods of electrodischarge purification of chemical liquids for the synthesis of polymeric materials with predefined properties. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2025;1(430):204–217. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2025.01.204-217>. EDN: CEMFRZ. (In Russ.).
6. Khasenov A. K., Nusupbekov B. R., Kusainov K. K. Electro-impulse Method of Surface Cleaning. *Life Science Journal*. 2013;10(12):1–5.
7. Vishnyakov V. I. Pulsed high-voltage electrical discharges in water: The resource for hydrogen production and water purification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(25):12500–12505. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.015>.
8. Кочеткова В. С., Смирнов Б. Ю. Сопряженная очистка отходящих дымовых газов от оксидов азота и углерода: проектные исследования // *Альманах современной науки и образования*. 2016. № 3 (105). С. 56–58. EDN: VOFDDN.
9. Kochetkova V. S., Smirnov B. Yu. Coupled purification of flue gases from nitrogen and carbon oxides: project study. *Almanac of Modern Science and Education*. 2016;3(105):56–58. EDN: VOFDDN. (In Russ.).
10. Захаренко В. А., Захаренко В. В., Николаев М. Ю., Шкаев А. Г. Электроимпульсная очистка карнизов // *Омский научный вестник*. 2019. № 5 (167). С. 77–81. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-77-81>. EDN: EAMEGF.
11. Zakharenko V. A., Zakharenko V. V., Nikolaev M. Yu., Shkayev A. G. Electric pulse cleaning of cornices. *Omsk Scientific Bulletin*. 2019;5(167):77–81. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-77-81>. EDN: EAMEGF. (In Russ.).
12. Khajouei R., Keramat J., Hamdami N. [et al.]. Effect of high voltage electrode discharge on the physicochemical characteristics of alginate extracted from an Iranian brown seaweed (Nizimuddinina zanardini). *Algal Research*. 2021;56:102326. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102326>. EDN: BPVEAW.
13. Alkhadra M. A., Su X., Suss M. E. [et al.]. Electrochemical Methods for Water Purification, Ion Separations, and Energy Conversion. *Chemical Reviews*. 2022;122(16):13547–13635. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00396>. EDN: RLWRKI.
14. Bereziuk A., Karlov O., Kryshchuk R. [et al.]. Vortex currents and magnetic forces of non-magnetic plate in the process of magneto-pulse treatment on the ideal ferromagnetic platform. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023;1(5):10–14. <https://doi.org/10.15199/48.2023.05.02>.
15. Bahramian B., Ma Y., Rohanizadeh R. [et al.]. A new solution for removing metal-based catalyst residues from a biodegradable polymer. *Green Chemistry*. 2016;18(13):3740–3748. <https://doi.org/10.1039/c5gc01687h>.
16. Whiba R., Su'ait M. S., Ahmad A. An affordable and easily accessible approach for acrylonitrile monomer purification through a simple column technique. *Journal of Materials Science*

and *Chemical Engineering*. 2024;12(4):18–28. <https://doi.org/10.4236/msce.2024.124002>. EDN: IGLZPI.

13. Makarov V. V., Kuznetsova O. P., Nikolaev M. Y. Issues and tasks of electro-impulse cleaning. *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020)*. 2020. P. 283–285. <https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9242109>. EDN: ZWDHKA.

14. Захаренко В. А., Татевосян А. С., Захарова Н. В. [и др.]. Расчет нестационарного магнитного поля электроимпульсной установки очистки угольной пыли с поверхности электростатических фильтров // *Промышленная энергетика*. 2019. № 12. С. 19–29. EDN: DGEQWH.

Zakharenko V. A., Tatevosyan A. S., Zakharova N. V. [et al.]. Raschet nestatsionarnogo magnitnogo polya elektroimpul'snoy ustanovki ochistki ugol'noy pyli s poverkhnosti elektrostaticheskikh fil'trov. *Promyshlennaya Energetika*. 2019;12: 19–29. EDN: DGEQWH. (In Russ.).

15. Diaz I., Ovejero G., Romero M. D. [et al.]. Purification process design in the production of styrene monomer. *Chemical Engineering and Processing*. 2010;49(4):367-375.

Вклад авторов:

М. Ю. Николаев. Постановка цели, задач исследования и научной проблемы, определение исходных данных для построения математической модели в программном комплексе ELCUT 6.0 Professional, анализ электромагнитного взаимодействия основных элементов электроимпульсной установки, общее редактирование текста и формулировка выводов.

А. А. Татевосян. Разработка имитационной математической модели электроимпульсной установки, ввод исходных параметров в программном комплексе ELCUT 6.0 Professional, вывод и обработка результатов.

Authors' contribution:

Mikhail Yu. Nikolaev. Setting goal, research objectives and scientific problems, determining the initial data for constructing a mathematical model in the ELCUT 6.0 Professional Software Package, analysing the electromagnetic interaction of the main elements of an electric pulse installation, general text editing and conclusions drawing.

Andrey A. Tatevosyan. Development of a mathematical simulation model of an electric pulse installation, input of initial parameters in the ELCUT 6.0 Professional Software Package, results processing.

Информация об авторах:

НИКОЛАЕВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1649-8920

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3046-2092>

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

e-mail: munp@yandex.ru

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6456-8370

AuthorID (РИНЦ): 163175

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

e-mail: aatatevosyan@omgtu.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 10.04.2026; принята к публикации 14.09.2026.

Information about the authors:

NIKOLAEV Mikhail Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Power Supply of Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 1649-8920

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3046-2092>

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

e-mail: munp@yandex.ru

TATEVOSYAN Andrey Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 6456-8370

AuthorID (RSCI): 163175

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0891-9244>

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

e-mail: aatatevosyan@omgtu.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 10.04.2026; accepted for publication 14.09.2026.