



УДК 621.391.82

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКРАНИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОРПУСОВ УСТРОЙСТВ

О.К. Епифанов^а, И.А. Салова^а^а АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

Адрес для переписки: epifanov_eok@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.12.16, принята к печати 17.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-332-339

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Епифанов О.К., Салова И.А. Анализ и оценка факторов, определяющих точность результатов компьютерного моделирования экранирующих свойств корпусов устройств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 332–339. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-332-339**Аннотация**

Предмет исследования. Исследованы факторы, определяющие точность компьютерного моделирования. Проанализированы свойства защитных экранирующих корпусов электронных и электротехнических устройств в условиях воздействия внешнего высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля. Исследовано влияние указанного электромагнитного поля, показаны взаимосвязи геометрических, магнитных и электрических параметров корпусов с их экранирующими свойствами. Приведена оценка достоверности выполненного расчетного анализа экранирующих свойств защитных корпусов рассматриваемых устройств. **Метод исследования.** Расчетная оценка и анализ электромагнитной обстановки в месте размещения таких устройств и эффективность экранирования на этапе проектирования выполнены методом компьютерного конечно-элементного численного моделирования. Исследованы качественные и количественные взаимосвязи экранирующих свойств корпуса со способами задания электромагнитного поля, с устанавливаемой при моделировании плотностью сетки конечных элементов, с магнитными и электрическими параметрами материала корпуса. **Основные результаты.** Показано, что на точность и достоверность получаемых результатов при компьютерном конечно-элементном численном моделировании переменных электромагнитных полей и оценке экранирующих свойств корпусов устройств существенно влияют три фактора. К этим факторам относятся: равномерность задаваемого однонаправленного внешнего электромагнитного поля, плотность построения сетки конечных элементов, достоверность значений магнитных и электрических свойств магнитомягких материалов, используемых при разработке конструкций экранирующих корпусов. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут найти применение в процессе принятия обоснованных решений при проектировании конструкций корпусов электронных и электротехнических устройств, в том числе защитных экранирующих оболочек для широких диапазонов напряженности и частоты внешнего высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля.

Ключевые слова

компьютерное моделирование, переменное электромагнитное поле, электромагнитное экранирование, корпус устройства, метод конечных элементов

ANALYSIS AND ESTIMATION OF FACTORS DETERMINING ACCURACY OF COMPUTER SIMULATION RESULTS OF SHIELDING HOUSING PROPERTIES OF ELECTRONIC DEVICES

О.К. Epifanov^а, I.A. Salova^а^а Concern «Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR" JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

Corresponding author: epifanov_eok@mail.ru, office@eprrib.ru

Article info

Received 15.12.16, accepted 17.02.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-332-339

Article in Russian

For citation: Epifanov O.K., Salova I.A. Analysis and estimation of factors determining accuracy of computer simulation results of shielding housing properties of electronic devices. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 332–339 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-2-332-339

Abstract

Subject of Study. The factors determining accuracy of computer simulation have been studied. Properties of the protective shielding housings of electrical and electronic devices have been analyzed under conditions of external high-intensity alternating electromagnetic field. The influence of this electromagnetic field has been studied, and the interrelationships between geometric, magnetic and electric parameters of the housings and their shielding properties have been shown. Authenticity estimation of the performed numerical analysis of the shielding properties is given. **Method.** Estimation and analysis of electromagnetic environment at the location of these devices at their development phase were carried out by computer finite element simulation method. And with this, qualitative and quantitative properties of shielding interaction with the housing were studied depending on the means of electromagnetic field definition, finite element mesh density, magnetic and electrical parameters of the housing material. **Main Results.** It is shown that there are at least three significant factors that directly effect on accuracy and authenticity of the finite element simulation results. These factors include: uniformity of specified unidirectional external electromagnetic field, density of the finite element mesh generation, authenticity of magnetic and electrical properties of magnetic materials used while making design of shielding housings. **Practical Relevance.** The results can be applicable in taking well-grounded decisions when designing the housings of electrical and electronic devices (like protective shielding housings for wide range of strength and frequency of the external high-intensity alternating electromagnetic field).

Keywords

computer simulation, alternating electromagnetic field, electromagnetic shielding, device housing, finite element method

Введение

Тенденции развития ряда высокоэнергетических механизмов и силового вентильного безредукторного электропривода предполагают непосредственное (встраиваемое) размещение в их конструкциях точных электронных и электромеханических устройств систем автоматического управления и диагностики в процессе эксплуатации [1–5]. Разработка и проектирование таких аналого-цифровых электронных и преобразующих электротехнических устройств [5–9] предполагают выполнение расчетной оценки степени влияния на их работоспособность внешних высокоинтенсивных переменных электромагнитных полей (ВЭП), а также выработку проектно-конструкторских решений защитных экранирующих оболочек для них.

Расчетная оценка и анализ электромагнитной обстановки в месте размещения указанных устройств может выполняться в настоящее время путем компьютерного конечно-элементного 2D-3D численного моделирования ВЭП средствами специализированного программного обеспечения (СПО) моделирования физических полей [10–12] с соответствующим определением параметров остаточного переменного электромагнитного поля внутри защищаемых конструкций и степени его ослабления защитной экранирующей оболочкой.

Особенностью конструкций современных встраиваемых электронных и электромеханических устройств является наличие в них корпусных элементов, необходимых для обеспечения, в том числе, требуемой устойчивости к весьма жестким внешним механическим и климатическим воздействиям при эксплуатации. В этих условиях корпусные элементы, выполняемые в виде замкнутых в магнитном отношении цилиндрических или прямоугольных корпусов из ферромагнитного токопроводящего материала, также обладают и свойствами экранирующих оболочек.

Экранирующие свойства таких корпусов связаны в общем случае с взаимодействием ВЭП с наведенными им в ферромагнитном токопроводящем материале корпуса вихревыми токами, создающими встречное по направлению переменное магнитное поле, и определяются глубиной проникновения ВЭП (электромагнитной волны) в ферромагнитный материал, которая, в свою очередь, определяется частотой ВЭП и магнитными и электрическими свойствами ферромагнитного материала корпуса, а именно величиной абсолютной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимостью [13, 14]. Из указанного следует, что эффективность экранирования зависит от толщины ферромагнитного корпуса устройства и от физических свойств его материала.

Итоговой целью проведения конечно-элементного моделирования является определение геометрических параметров экранирующего корпуса устройства и его материала для достижения заданного уровня ослабления ВЭП внутри корпуса устройства.

Моделирование в общем случае состоит из трех этапов [15]:

- создание геометрической параметризованной модели устройства, размещаемого в исследуемой области распространения ВЭП;
- задание ВЭП требуемой частоты и напряженности в исследуемой геометрической области размещения проектируемого устройства;
- численный итерационный анализ параметров и характера распределения переменного электромагнитного поля внутри и по толщине экранирующего корпуса устройства во взаимосвязи со свойствами его материала и геометрии.

В общем случае [12] при конечно-элементном моделировании, как показали результаты моделирования различных электронных и электромеханических устройств [15], существуют, по крайней мере, три фактора, которые непосредственно определяют точность и достоверность его результатов:

- равномерность задаваемого однонаправленного ВЭП;

- плотность сетки конечных элементов, описывающих исследуемую геометрическую область;
- электромагнитные свойства материала экранирующего корпуса устройства.

Предметом дальнейшего рассмотрения будут являться вопросы корректного задания ВЭП требуемой частоты и напряженности в исследуемой геометрической области размещения проектируемого устройства и вопросы точности и достоверности результатов конечно-элементного моделирования.

Геометрическая модель и задание ВЭП

ВЭП в исследуемой геометрической области размещения проектируемого устройства может быть создано средствами СПО как удаленным источником, так и источником, имеющим конечные размеры и находящимся вблизи проектируемого устройства, а именно протяженным источником электромагнитного поля – проводящим цилиндром с током или точечным источником электромагнитного поля с током. Вид источника ВЭП определяется построением аппаратуры, в которой подлежит размещению проектируемое устройство. Пример исследуемой геометрической области размещения и геометрической модели проектируемого устройства в виде цилиндра приведен на рис. 1, где t_k – толщина корпуса устройства ($t_k = 5$ мм), R_k и h_k – соответственно радиус основания и высота корпуса устройства ($R_k = h_k = 100$ мм). Следует отметить, что корпус устройства может быть как прямоугольным, так и цилиндрическим, но замкнутым в магнитном отношении.

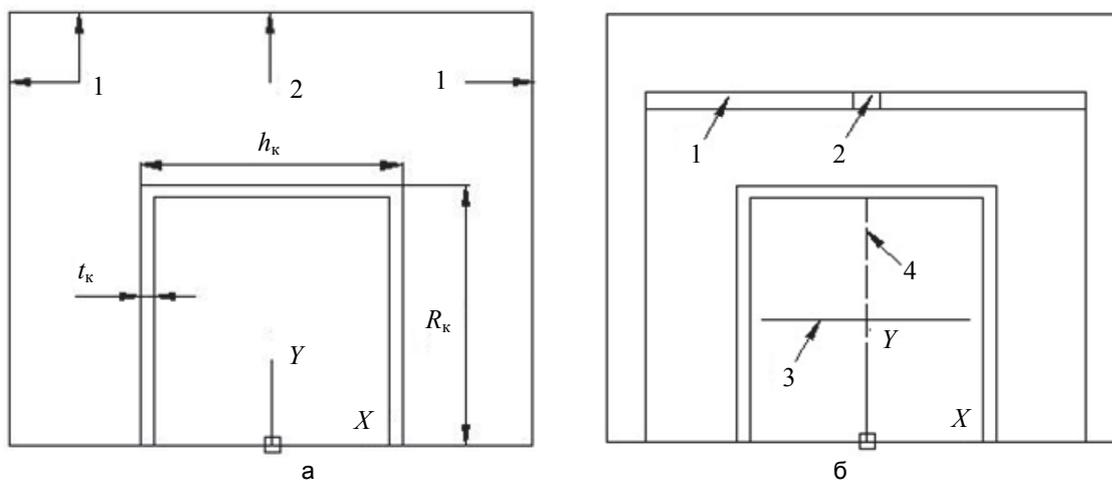


Рис. 1. Геометрическая область размещения и геометрическая модель проектируемого устройства с экранирующим корпусом: с удаленным источником высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля: 1 – граница принятой геометрической области электромагнитного поля; 2 – граница для задания величины напряженности электромагнитного поля (а); с проводящим цилиндром с током и точечным источником с током для генерации высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля: 1 – проводящий цилиндр; 2 – точечный источник; 3 и 4 – контуры для определения величины напряженности (б)

Для создания ВЭП в случае удаленного источника задаются граничные условия в геометрической области размещения проектируемого устройства. В осесимметричной постановке на горизонтальной границе 2 (рис. 1, а) устанавливается значение магнитного потока, обеспечивающего создание ВЭП в исследуемой области с заданной величиной его напряженности. Аналогично, для геометрической области, изображенной на рис. 1, б, при создании ВЭП проводящим цилиндром 1 или точечным источником 2 величина плотности электрического тока в них задается соответствующей требуемой величине его напряженности. Для создания ВЭП в случае протяженного источника используется проводящий цилиндр, когда его линейные размеры превосходят размеры корпуса устройства в 1,5–2 раза. Точечный источник ВЭП создается тем же проводящим цилиндром, когда его линейные размеры меньше, по крайней мере, в 10 раз, чем размеры корпуса проектируемого устройства.

Равномерность задаваемого однонаправленного ВЭП

В зависимости от выбранного способа создания ВЭП в исследуемой геометрической области равномерность его распределения различна, что проиллюстрировано на рис. 2. Это приводит к неточности задания установленной исходными данными напряженности ВЭП в исследуемой геометрической области, например, 750 А/м частоты 50 Гц, как это показано на рис. 3, хотя среднее значение при указанных трех способах его создания равно именно заданной величине.

Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что при задании значения магнитного потока (способ задания граничных условий для удаленного источника) электромагнитное поле создается равномерным внутри всей области, где будет располагаться проектируемое устройство. При создании ВЭП за счет прете-

кания тока в проводящем цилиндре напряженность распределяется неравномерно как по горизонтали, так и по вертикали (контуры 3 и 4 на рис. 1, б), причем точечный источник поля создает значительную неравномерность, что приводит к недостоверности получаемых в дальнейшем результатов моделирования.

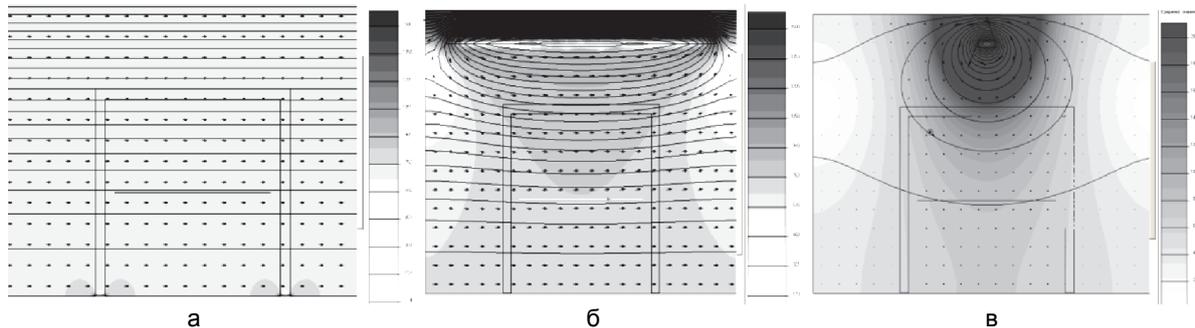


Рис. 2. Распределение напряженности высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля, созданного: удаленным источником (а); протяженным проводящим цилиндром (б); точечным источником (в)

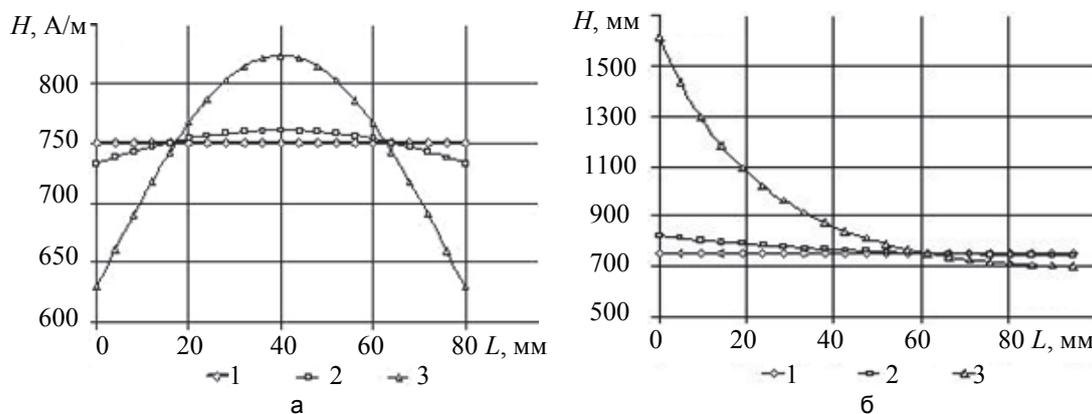


Рис. 3. Графики изменения напряженности H (А/м) высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля вдоль контуров L (мм) согласно рис. 1, б: 3 (а); 4 (б); при задании: 1 – удаленным источником; 2 – протяженным проводящим цилиндром; 3 – точечным источником

Плотность сетки конечных элементов

В процессе построения геометрической области размещения проектируемого устройства для случая удаленного источника ВЭП подбирается значение функции магнитного потока на границе 2 (рис. 1, а), которое остается неизменным при дальнейшем анализе. При этом задаются нормативные свойства ферромагнитного материала корпуса устройства, например, для электротехнической стали – относительная магнитная проницаемость $\mu=1000$ и удельная электрическая проводимость $\gamma=7040000$ См/м [16]. Первоначальная генерация сетки конечных элементов в среде СПО в процессе моделирования, как правило, выполняется автоматически. На рис. 4 в качестве примера показана первоначальная сетка конечных элементов (рис. 4, а), где внутри корпуса указан контур 1, вдоль которого определяется напряженность остаточного электромагнитного поля, а на рис. 5, а, приведен график распределения вдоль этого контура 1 напряженности остаточного переменного электромагнитного поля H_3 в экранируемой области (внутри корпуса устройства). Среднее значение напряженности остаточного электромагнитного поля внутри корпуса устройства по контуру 1 составило $H_3=28,2$ А/м, а коэффициент экранирования K_3 ферромагнитным корпусом при первоначальной генерации сетки, определяемый отношением величины напряженности ВЭП $H=750$ А/м к среднему значению H_3 , составил $K_3 \approx 28$.

При уплотнении сетки (рис. 4, б) график распределения напряженности переменного электромагнитного поля вдоль контура 1 соответствует рис. 5, б, а его среднее значение внутри корпуса устройства по контуру 1 составило $H_3=1,04$ А/м ($K_3=770$).

В таблице представлены значения переменного магнитного поля вдоль контура 1 внутри корпуса устройства (рис. 5, а) и соответствующих коэффициентов экранирования в зависимости от числа узлов сетки (степени ее уплотнении).

Как следует из таблицы, после третьего шага уплотнения сетки конечных элементов средние значения напряженности практически не изменяются. Это связано с точностью определения вихревых токов по толщине ферромагнитного корпуса устройства в процессе моделирования в среде СПО.

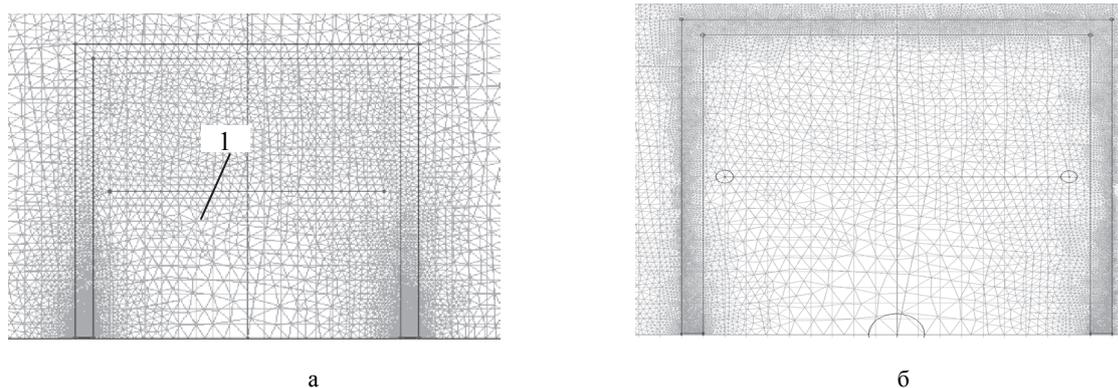


Рис. 4. Сетка конечных элементов: первоначальная сетка с числом узлов 5579 (а); сетка после первого уплотнения с числом узлов 17684 (б)

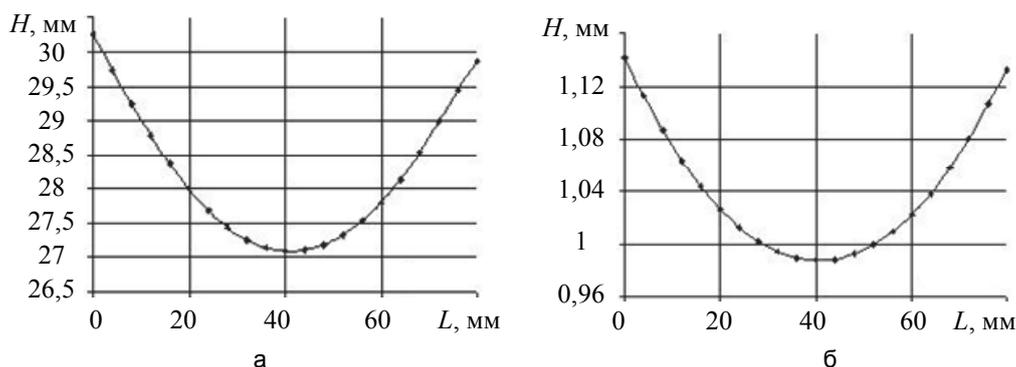


Рис. 5. Распределение напряженности переменного электромагнитного поля вдоль контура 1: при первоначальном разбиении сетки конечных элементов (а); при первом уплотнении сетки конечных элементов (б)

| Номер шага уплотнения сетки | Число узлов сетки | Средняя напряженность H_3 , А/м | Коэффициент экранирования K_3 |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Первоначальная сетка | 5579 | 28,2 | 28 |
| 1 | 17684 | 1,04 | 770,7 |
| 2 | 81558 | 0,91 | 879,9 |
| 3 | 248677 | 0,89 | 900,6 |
| 4 | 455235 | 0,87 | 919,1 |
| 5 | 713729 | 0,86 | 931,2 |
| 6 | 1024946 | 0,85 | 940,3 |

Таблица. Значения средней напряженности H_3 и коэффициента экранирования K_3 в зависимости от шага уплотнения и числа узлов сетки

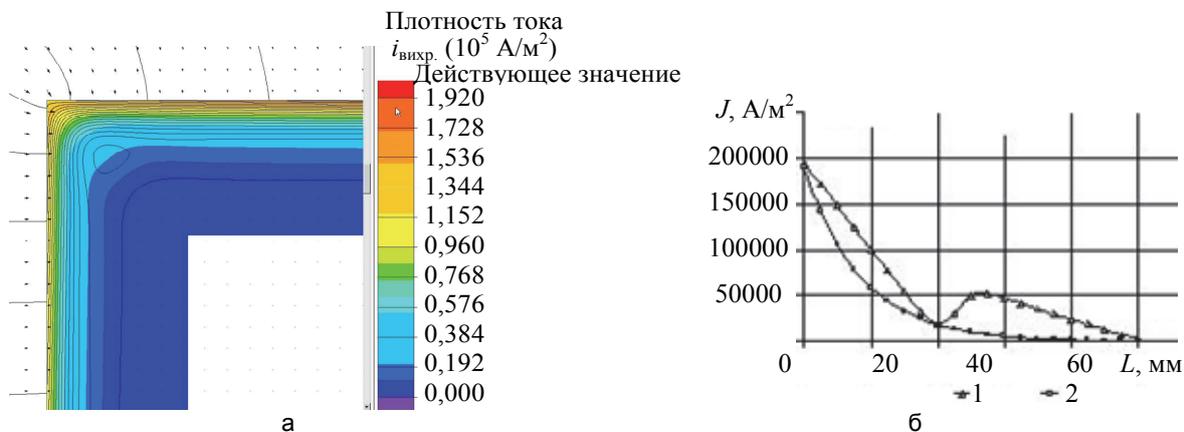


Рис. 6. Распределение и изменение плотности вихревых токов по сечению корпуса (его толщине t_k): картина распределения в среде специализированного программного обеспечения плотности вихревых токов по толщине корпуса (а); график изменения плотности вихревых токов при различной плотности разбиения сетки (б)

На рис. 6 приведены распределение (рис. 6, а) и изменение (рис. 6, б) величины плотности J вихревых токов по сечению корпуса устройства (толщине корпуса t_k – рис. 1, а) при различной плотности разбиения сетки. На рис. 6, б, кривая 1 соответствует исходному разбиению сетки, а кривая 2 – третьему шагу уплотнения сетки.

В верхней части по толщине корпуса, согласно рис. 4, а, располагается всего 2 слоя узлов конечных элементов, что явно недостаточно, и поэтому возникают существенные погрешности при вычислении вихревых токов, о чем свидетельствует кривая 1 на рис. 6, б, плотности вихревого тока при исходном разбиении сетки конечных элементов.

Данные результаты получены при номинальных значениях μ и γ ферромагнитного материала корпуса устройства, которые в дальнейшем ухудшаются в процессе технологической обработки корпуса устройства.

Электромагнитные свойства материала экранирующего корпуса устройства

Поскольку магнитомягкие стали и сплавы, из которых преимущественно изготавливаются конструкции рассматриваемых корпусов вышеупомянутых устройств, подвергаются технологической обработке в процессе производства, в частности механической обработке, то их магнитные и электрические свойства, как правило, ухудшаются относительно нормативных значений: по μ – до 3 раз, а по γ – до 1,5 раз. Проведение анализа влияния изменений μ и γ , характеризующих свойства ферромагнитного материала корпуса проектируемого устройства, на его экранирующую способность позволяет, в конечном итоге, определить более достоверное значение толщины корпуса при принятом способе производства и минимизировать его с точки зрения достижения требуемого значения H_3 . Моделирование и соответственно указанный анализ целесообразно выполнять после третьего шага уплотнения сетки конечных элементов.

В качестве примера для геометрической модели корпуса устройства (рис. 1, а) на рис. 7 и 8 приведены полученные по результатам моделирования зависимости средних значений напряженности H_3 внутри корпуса устройства и глубины проникновения δ ВЭП по его толщине для различных значений μ и γ при напряженности $H=750$ А/м частоты 50 Гц.

Из этих результатов (рис. 7 и 8) следует, что ошибка в определении H_3 при недостоверном значении μ может составлять до 10 раз и более, несмотря на то, что неточность в определении δ не превышает 2 раз. При этом влияние на точность определения H_3 недостоверного значения γ можно считать прямо пропорциональным.

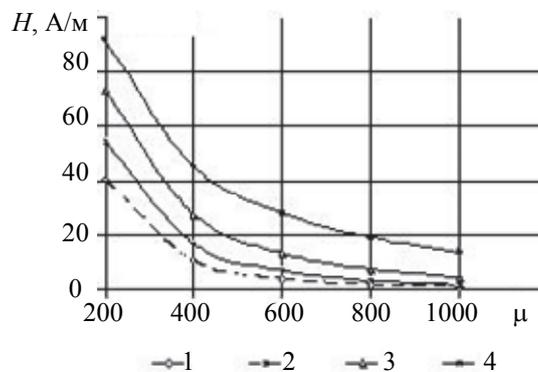


Рис. 7. Зависимость напряженности H_3 внутри корпуса от μ и γ :
 1 – $\gamma=7040000$ См/м; 2 – $\gamma=5000000$ См/м; 3 – $\gamma=3000000$ См/м; 4 – $\gamma=1000000$ См/м

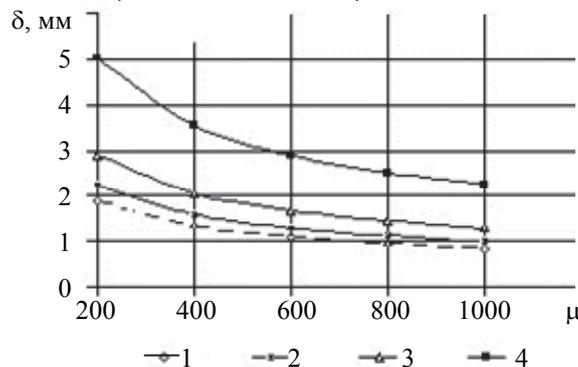


Рис. 8. Зависимость глубины проникновения переменного магнитного поля от μ для частоты $f=50$ Гц:
 1 – $\gamma=7040000$ См/м; 2 – $\gamma=5000000$ См/м; 3 – $\gamma=3000000$ См/м; 4 – $\gamma=1000000$ См/м

Заключение

Показано, что, по крайней мере, три фактора при компьютерном конечно-элементном численном моделировании переменных электромагнитных полей и экранирующих свойств корпусов приборов существенно влияют на точность и достоверность результатов моделирования, а именно:

- способы задания высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля, определяющие его равномерность;
- плотность построения сетки конечных элементов, связанная с числом ее узлов;
- достоверность значений магнитных и электрических свойств магнитомягких материалов, используемых при моделировании конструкций экранирующих корпусов.

Изложенные в работе подход и методика анализа факторов, определяющих точность и достоверность результатов определения параметров остаточного переменного электромагнитного поля внутри защищаемых конструкций проектируемых устройств, а также степень его ослабления защитной экранирующей оболочкой при использовании для этого средств компьютерного конечно-элементного 2D-3D численного моделирования, не являются исчерпывающими, но являются достаточными для практического применения при проектировании конструкций корпусов устройств как защитных экранирующих оболочек для широких диапазонов напряженности и частоты высокоинтенсивного переменного электромагнитного поля.

Литература

1. Дядик А.Н., Никифоров Б.В. Корабельные энергетические системы. Новочеркасск: Лик, 2012. 678 с.
2. Пешехонов В.Г., Гутнер И.Е., Зиненко В.М., Савик В.Ф., Янушкевич В.Е. Перископный комплекс «Парус-98» // Гироскопия и навигация. 2005. № 1(48). С. 5–15.
3. Мкртычян А.Р., Башкеев Н.И., Якимовский Д.О., Акашев Д.И., Яковец О.Б. Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов // Гироскопия и навигация. 2015. № 1 (88). С. 93–99.
4. Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С. Новый аэроморской гравиметр серии «ЧЕКАН» // Гироскопия и навигация. 2014. № 1 (84). С. 26–34.
5. Медведев А.В., Молочников А.А., Епифанов О.К., Орлов М.В. Система пространственной стабилизации линии визирования головной призмы подвижного объекта // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. № 7. С. 275–284.
6. Епифанов О.К. Преобразование угловых перемещений крупногабаритных платформ в цифровой код // Судостроение. 2000. № 4. С. 39–44.
7. Епифанов О.К., Матвеев Ю.В. Комплексирование электромеханических и электронных частей в малогабаритных цифровых преобразователях угла типа «углопараметр-код» // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах». Ульяновск, 2011. С. 162–164.
8. Епифанов О.К., Зиненко В.М., Аксененко В.Д., Молочников А.А. Комплексные решения высокоточного цифрового преобразования угловых перемещений в аппаратуре межотраслевого применения // Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции «Датчики и системы – 2006». Пенза, 2006. С. 263–273.
9. Аксененко В.Д., Епифанов О.К. Новое поколение высокоточных цифровых преобразователей угла // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 15–19.
10. Программный продукт ELCUT v.5.9. СПб: Производственный кооператив ТОР, 2013.
11. Клявин А. ANSYS, Inc: Современные методы моделирования электромагнитного поля // САПР графика. 2011. №6. С. 52–55.
12. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: СамГТУ, 2010. 271 с.
13. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975. 112 с.
14. Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. М.-Л.: Энергия, 1967. 208 с.
15. Епифанов О.К., Салова И.А. Моделирование и оценка электромагнитной устойчивости электромеханических устройств к электромагнитным полям и помехам методом конечных элементов // Материалы XXIX научно-технической конференции памяти Н.Н. Острякова. СПб., 2014. С. 398–402.

References

1. Dyadik A.N., Nikiforov B.V. *Ship Power Systems*. Novocherkassk, Lik Publ., 2012, 678 p. (In Russian)
2. Peshkhonov V.G., Gutner I.E., Zinenko V.M., Savik V.F., Yanushkevich V.E. Periscope complex "Parus-98". *Gyroscopy and Navigation*, 2005, no. 1, pp. 5–15. (In Russian)
3. Mkrtychyan A.R., Bashkeev N.I., Yakimovskii D.O., Akashev D.I., Yakovets O.B. Control moment gyroscopes for spacecraft attitude control systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 236–240. doi: 10.1134/S2075108715030116
4. Krasnov A.A., Sokolov A.V., Elinson L.S. A new air-sea shelf gravimeter of the Chekan series. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 131–137. doi: 10.1134/S2075108714030067
5. Medvedev A.V., Molochnikov A.A., Epifanov O.K., Orlov M.V. Spatial Stabilization system of boresight head prism for a moving vehicle. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2012, no. 7, pp. 275–284. (In Russian)
6. Epifanov O.K. Conversion of angular movements of large-size platforms to digital code. *Sudostroenie*, 2000, no. 4, pp. 39–44. (In Russian)
7. Epifanov O.K., Matveev Yu.V. Integration of electromechanical and electronic parts in small digital angle converters such as angle-parameter-code. *Proc. I All-Russian Conf. on Devices for Signal Measuring, Collecting and Processing in Information-Control Systems*. Ulyanovsk, Russia, 2011, pp. 162–164. (In Russian)
8. Epifanov O.K., Zinenko V.M., Akseenko V.D., Molochnikov A.A. Complex solutions for high-precision digital conversion of angular displacements in inter-branch equipment. *Proc. All-Russian Conf. on Sensors and Systems 2006*. Penza, Russia, 2006, pp. 263–273. (In Russian)
9. Akseenko V.D., Epifanov O.K. A new generation of precision angle digitizers. *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 252–258. doi: 10.1007/s11018-013-0189-y
10. *Software ELCUT v.5.9*. St. Petersburg, Proizvodstvennyi Kooperativ TOR Publ., 2013. (In Russian)
11. Klyavin A. ANSYS, Inc: Modern methods of electromagnetic field modeling. *SAPR i Grafika*, 2011, no. 6, pp. 52–55. (In Russian)
12. Bruyaka V.A. *Engineering Analysis in ANSYS Workbench*. Samara, Russia, SSTU Publ., 2010, 271 p. (In Russian)
13. Shapiro D.N. *Fundamentals of the Electromagnetic Shielding Theory*. Leningrad, Energiya Publ., 1975, 112 p. (In Russian)
14. Lammeraner J., Staffl M. *Eddy Currents*. London, 1966, 233 p.
15. Epifanov O.K., Salova I.A. Modeling and evaluation of electromagnetic stability of electromechanical devices to electromagnetic fields and noise by the finite element method. *Proc. XXIX Scientific and Technical Conference N.N.*

16. Шматко О.А., Усов Ю.В. Структура и свойства металлов и сплавов. Электрические и магнитные свойства металлов и сплавов. Киев: Наукова думка, 1987. 584 с.

Ostryakova Memory. St. Petersburg, 2014, pp. 398–402. (In Russian)

16. Shmatko O.A., Usov Yu.V. *Structure and Properties of Metals and Alloys. Electrical and Magnetic Properties of Metals and Alloys*. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987, 584 p. (In Russian)

Авторы

Епифанов Олег Константинович – кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, epifanov_eok@mail.ru, office@eprib.ru

Салова Ирина Александровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, salova_irine@mail.ru, office@eprib.ru

Authors

Oleg K. Epifanov – PhD, Section head, Concern «Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR" JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, epifanov_eok@mail.ru, office@eprib.ru

Irina A. Salova – PhD, Scientific researcher, Concern «Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR" JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, salova_irine@mail.ru, office@eprib.ru