

УДК 621.396

## О проблемах автоматизации разработки электродинамических объектов на основе комбинированного подхода

Т.В. Аветисян<sup>1</sup>, И.Я. Львович<sup>2</sup>, Я.Е. Львович<sup>2</sup>, А.П. Преображенский<sup>2</sup>✉,  
Ю.П. Преображенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия

*Формирование электродинамических объектов с заданными уровнями рассеяния электромагнитных волн может быть связано с решением задач обеспечения электромагнитной совместимости, уменьшения их радиолокационной заметности или формирования электромагнитной обстановки с заранее определенными критериями. В данной работе рассматривается подход, демонстрирующий особенности создания сложных электродинамических объектов. Рассмотрен пример применения разработанных подходов для управления характеристиками сложного электродинамического объекта. Объект состоит из металла, на который нанесен слой диэлектрического материала. Определялись размеры частей электродинамического объекта, а также толщина диэлектрического слоя для обеспечения необходимого уровня электродинамического излучения в заданном секторе углов наблюдения.*

*Ключевые слова: автоматизация, электродинамический объект, оптимизация, моделирование.*

## On the problems of automating the development of electrodynamic objects based on a combined approach

T.V. Avetisyan<sup>1</sup>, I.Ya. Lvovich<sup>2</sup>, Ya.E. Lvovich<sup>2</sup>, A.P. Preobrazhenskiy<sup>2</sup>✉,  
Yu.P. Preobrazhenskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

*The formation of electrodynamic objects with specified levels of electromagnetic wave scattering can be associated with the solution of the problems of ensuring electromagnetic compatibility, reducing their radar signature, or forming an electromagnetic environment with predetermined criteria. This paper discusses an approach that demonstrates the features of creating complex electrodynamic objects. An example of the application of the developed approaches for controlling the characteristics of a complex electrodynamic object is considered. The object consists of a metal on which a layer of dielectric material is applied. The dimensions of the parts of the electrodynamic object were determined, as well as the thickness of the dielectric layer to ensure the necessary level of electrodynamic radiation in a given sector of observation angles.*

*Keywords: automation, electrodynamic object, optimization, modeling.*

Различные электродинамические объекты входят в соответствующие, применяемые на практике, технические устройства. Технические устройства могут быть связаны с приемом или переизлучением электромагнитных волн. При формировании сложных электродинамических систем разработчики стремятся к тому, чтобы осуществлять решение задач, связанных с управлением распределением

рассеянных электромагнитных полей. Во многих случаях электродинамические объекты являются сложными по своей структуре [1, 2].

Создаются они на базе множества объектов, каждый из которых будет выполнять свою функцию. Для разработки электродинамических систем, которые состоят из большого числа объектов, применяются системы автоматизированного проектирования (САПР).

Если электродинамические объекты объединяются в систему, то она будет обладать новыми характеристиками. Необходимо проводить оценку их качества. В данной работе предлагается подход, который позволяет это реализовать. Система электродинамических объектов может быть сформирована различным образом. В этой связи могут потребоваться оптимизационные подходы. Анализ показал, что в качестве перспективного можно рассматривать метод, в котором рассматриваются несколько критериев. Их необходимо применять последовательно [3, 4].

Проектные решения содержат в себе несколько составляющих. Их требуется оптимизировать с точки зрения получения конечного решения.

Цель работы состоит в описании характеристик системы, реализующей предлагаемый подход, ее структуры.

Рассмотрим основные особенности базового модуля, связанного с управлением характеристиками сложных электродинамических объектов, который является основой в рассматриваемой системе [5].

Электродинамические объекты разделяются на различные классы, которые характеризуются числом входящих в объекты составляющих, формой объектов, наличием в составе объектов радиопоглощающих компонентов и др. Для каждого из классов может быть выделена  $q$ -я совокупность характеристик. Они связаны с направлениями рассеяния электромагнитных излучений, видами связей между составляющими электродинамических объектов и др.

Выделяется несколько уровней в системе, которая предназначена для того, чтобы осуществлять управление такими электродинамическими объектами, которые будут принадлежать к разным классам [6].

При моделировании существуют возможности для реализации механизмов редукции, позволяющих провести группировку электродинамических объектов, которые принадлежат к различным классам [7].

Основные расчеты, связанные с расчетом электродинамических характеристик, реализуются при математическом моделировании на основе метода интегральных уравнений. Процедуры управления в ходе реализации связаны с тем, что, с одной стороны, должна быть обеспечена возможность для реализации электродинамическим объектом основного функционала, с другой стороны, необходимо поддерживать действия, которые связаны с перестройкой электродинамического объекта [8, 9].

Основываясь на этом, мы можем сформировать структуру системы управления характеристиками сложных электродинамических объектов. При этом необходимо учитывать то, что оценки характеристик отдельных элементов, которые будут входить в состав таких объектов должны осуществляться с высокой точностью [10].

На рисунке 1 дана иллюстрация структурной схемы основного модуля такой системы управления по базовому электродинамическому объекту, в которую входят два контура управления.

В данном модуле, с учетом того, что рассматривается  $q$ -я совокупность характеристик, можно выделить совокупность подсистем оценки, которые соответствуют операторам оценок  $\{H_0, H_1, \dots, H_B\}$ .

На рисунке 1 показан контур управления функционированием электродинамического объекта. Приведем пример. Существуют подходы, для которых

исследователи стремятся к предсказанию или моделированию электромагнитных волн до того, как размещены приемные и передающие устройства. При этом можно проводить оптимизацию по передающим устройствам на основе соответствующей метрики [11].

В ней необходимо, чтобы были учтены не только характеристики размещения электродинамических устройств, трафика и экономической эффективности. Требуется рассматривать особенности воздействия на окружающую среду со стороны электромагнитного поля. Для этого могут быть использованы различные методы или их комбинации.

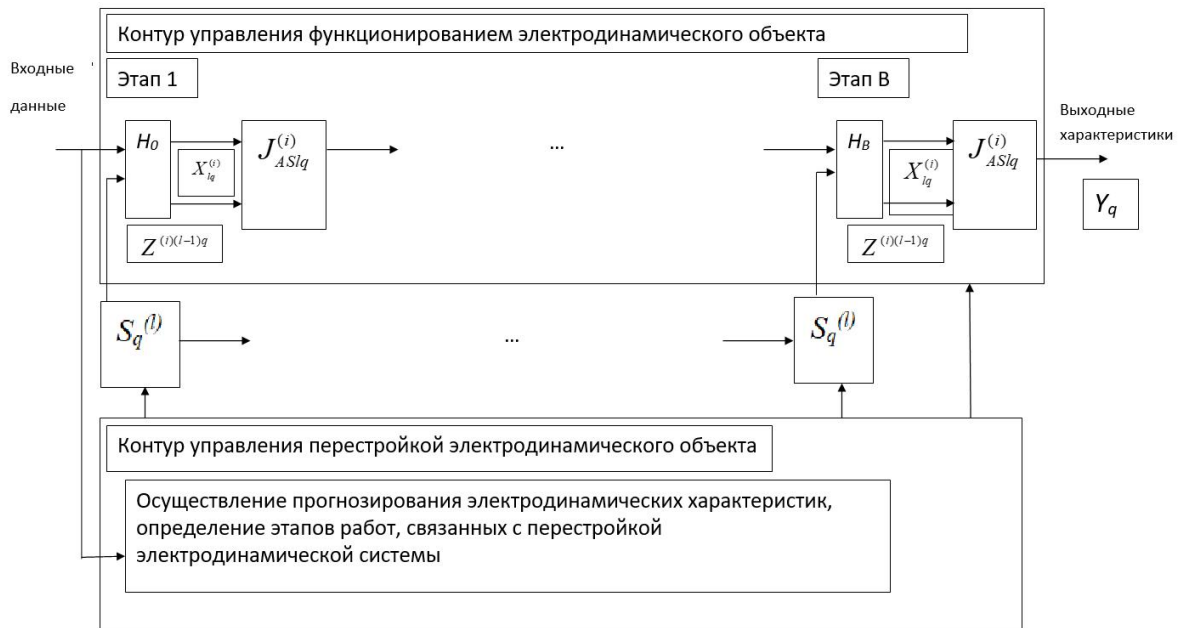


Рисунок 1. Модуль системы управления электродинамическими объектами, в которую входят два контура управления

В модуле есть контур управления перестройкой электродинамического объекта. Для рассмотрения особенностей его работы может использоваться имитационное моделирование. Происходит изменение характеристик электродинамических объектов –  $S_q^{(l)}$ .

При управлении характеристиками электродинамических объектов необходимо одновременно образом проводить учет по двум критериям:

$J_1$  – критерий, который показывает эффективность функционирования сложного электродинамического объекта;

$J_2$  – критерий, который показывает эффективность изменения сложного электродинамического объекта с учетом заданных условий.

Предлагается рассматривать такой упрощенный подход:

$$J_{\perp lq}^{(i)}(U_{lq}^{(i)}) = \{f_{\perp lq\gamma}(Y_{lq}^{(i)}, U_{lq}^{(i)}) \geq f_{\perp lq\gamma}^{зад}(U_{lq}^{(i)}), \gamma = 1, Y_{\perp lq}(U_{дй}^{(i)})\}. \quad (1)$$

Количество формируемых неравенств  $\gamma_{\perp lq}(U_{lq}^{(i)})$ , а также вид представления функции  $f_{\perp lq\gamma}(\bullet)$ , определяет то, какие будут размеры электродинамических объектов.

При этом учитывается 1-я итерация в расчетах для q-й совокупности характеристик. При этом должна выполняться  $U_{lq}^{(i)}$ -я цель, связанная с преобразованием рассматриваемого электродинамического объекта. На рисунке 1

$X_{lq}^{(i)}$  – являются средствами, на основе которых происходит достижение требуемых целей,  $Z^{(i)(l-1)q}$  – являются результатами измерений характеристик электродинамических объектов. Для того, чтобы оптимизировать электродинамические компоненты, требуется, чтобы были указаны весовые коэффициенты по каждому критерию. Необходимо учитывать, что возможна ситуация, в которой процессы улучшения по одному из параметров будут вести к тому, что будет «осуществляться» ухудшение в другом. Чтобы обеспечить эффективное функционирование электродинамического объекта, требуется выполнение требований по обеспечению справедливости всех неравенств, которые входят в (1). Электродинамический объект будет формироваться с учетом заданного качества  $J_{ОЦлq}^{(i)}$ . Оно обеспечивается на базе множества операторов  $\{H_{lq}^{(i)}\}$ . Качество рассматривается в виде многомерного и многопараметрического представления [12, 13].

Алгоритм, который связан выделением основного параметра качества, содержит несколько шагов:

На шаге № 1 – реализуется упорядочивание по базовым электродинамическим компонентам: для каждой из  $n$  электродинамических компонентов, входящих в объект. При этом учитываются значения обозначенного критерия. Реализуется процесс ранжирования по элементарным отражателям с разным типом отражения электромагнитных волн.

Процесс вычисления допуска для шага № 2 реализуется по каждому электродинамическому компоненту:  $e$  – является номером электродинамического компонента [14, 15].

Для шага № 3 элементарные отражатели  $e$ -той электродинамической подсистемы, которые будут превосходить значения параметра  $\Delta$ , отбрасываются. Таким образом реализуется процесс редукции.

В том случае, когда хотя бы в одной электродинамической подсистеме нет ни одного элементарного отражателя, требуется, чтобы произошло расширение по ограничениям параметров. После этого требуется провести возврат к шагу № 1.

Далее происходит переход к следующему критерию качества для шага № 4. Пока не произойдет рассмотрение всех критериев, будет происходить реализация вышеуказанного процесса.

Процесс вычислений значений целевой функции в оптимизационной задаче, связан с реализацией шагов № 5 и № 6. Учитывается вклад от каждой из электродинамических подсистем в ходе процессов поиска решения. Допуск на целевую функцию мы предлагаем задавать так:

$$f(v_i) = f_i^{\min} = \frac{f_{\max} + f_{i-1}^{\min}}{2}, \quad (2)$$

здесь  $f_{i-1}^{\min} = f^{\min}$ , а  $f_i^{\min}$  – рассматривается в виде суммы минимальных значений целевой функции рассматриваемой задачи.

Когда происходит реализация последнего шага № 7, то учитывается то, какие из электродинамических подсистем вошли в состав всей электродинамической системы.

Решение, которое получено в последней итерации, рассматривается в виде результата работы алгоритма [16, 17].

Предлагаемый комбинированный алгоритм для автоматизации разработки сложных электродинамических объектов состоит из нескольких основных этапов:

1. Задание начальных размеров электродинамического объекта, расположения материалов, которые осуществляют поглощение электромагнитных излучений.
2. Проведение расчетов характеристик рассеяния сложного электродинамического объекта на основе метода интегральных уравнений.
3. Проверка критерия качества электродинамической системы.
4. Оптимизация параметров электродинамической системы, основываясь на значениях критерия качества.

Структура анализируемого электродинамического объекта приведена на рисунке 2. Мы наблюдаем объект со стороны, перпендикулярной его боковой поверхности. Его размер в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, составляет  $5\lambda$ , где  $\lambda$  – длина электромагнитной волны. Объект является металлическим, то есть от него хорошо отражаются электромагнитные волны. На данном объекте есть участок с диэлектрическим слоем, имеющим толщину  $d_2$ . Мы должны задать входные параметры:  $L_1 = 15,1\lambda$ ,  $L_2 = 4\lambda$ ,  $L_3 = 3,2\lambda$ ,  $d_1 = 1,5\lambda$ ,  $L_4 = 2,3\lambda$ . Задаются характеристики диэлектрического материала:  $\varepsilon = 0,2 - 0,4j$ ,  $\mu = 0,3 - 0,7j$ . В ходе решения задачи требуется определить значения размеров в электродинамическом объекте  $L_5$  и  $d_2$ .

В качестве критерия, который учитывается, рассматривается условие того, что в секторе углов наблюдения  $0^\circ < \varphi < 7^\circ$  значения эффективной площади рассеяния (ЭПР) не будут превышать 21,3 дБ. При проектировании необходимо было минимизировать общую возможную площадь рассматриваемого объекта. В ходе реализации построенного алгоритма было найдено три возможных варианта: 1)  $L_5 = 1,27\lambda$ ,  $d_2 = 1,35\lambda$ ; 2)  $L_5 = 2,8\lambda$ ,  $d_2 = 1,33\lambda$ ; 3)  $L_5 = 2,1\lambda$ ,  $d_2 = 1,58\lambda$ . Основываясь на цели проектирования, требуется выбрать первый вариант.

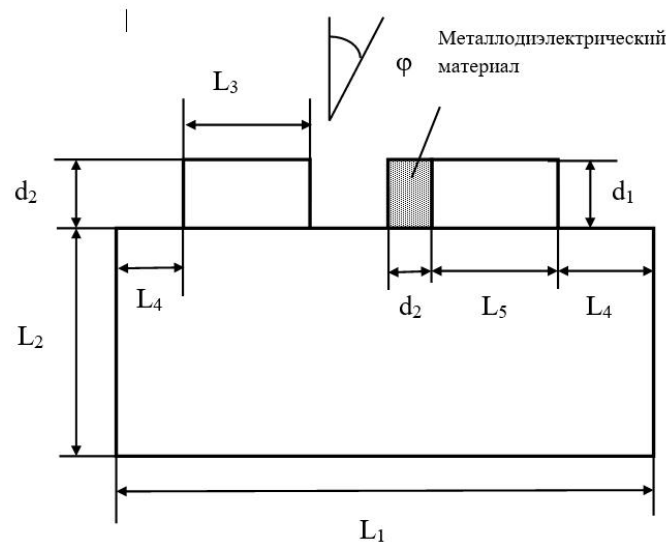


Рисунок 2. Электродинамический объект, для которого проводится анализ параметров, обеспечивающих требуемые характеристики рассеяния

В данной работе проведен анализ возможностей основных особенностей системы, на основе которой возможно осуществлять управление характеристиками сложных электродинамических систем. Показана структура основного модуля указанной системы. Рассмотрен пример построения сложного электродинамического объекта. На основе обозначенных требований по уровням рассеянных полей даны рекомендации по проектируемому электродинамическому объекту.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Унгер А.Ю. Анализ возможностей пассивной радиолокации при работе в диапазоне ультракоротких волн / А.Ю. Унгер // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 2.
2. Троценко А.С. Высокоуровневая структура модулей для построения специальных систем автоматизированного проектирования / А.С. Троценко, А.А. Успехов, М.И. Чижов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 3.
3. Троценко А.С. Специальное программное средство генерации макроэлементов в методе внешних конечноэлементных аппроксимаций / А.С. Троценко, А.А. Успехов, М.И. Чижов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9. – № 2.
4. Аветисян Т.В. Особенности оценки средних характеристик рассеяния объектов / Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 2.
5. Аветисян Т.В. Исследование коэффициента преломления морской воды при реализации подводной радиосвязи / Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский, Ю.П. Преображенский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 3.
6. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах / С.В. Ерасов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2013. – № 1 (10). – С. 20-26.
7. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети wi-fi / Е.Н. Казаков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – Т. 4. – № 1.
8. Преображенский Ю.П. Моделирование распространения радиоволн для условий дифракции / Ю.П. Преображенский // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ответственный редактор А.А. Горохов. – Курск, 2018. – С. 183-186.
9. Преображенский Ю.П. Рассеяние радиоволн на сложных объектах / Ю.П. Преображенский // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ответственный редактор А.А. Горохов. – Курск, 2018. – С. 191-194.
10. Преображенский Ю.П. Распространение радиоволн для объектов с полостями / Ю.П. Преображенский // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ответственный редактор А.А. Горохов. – Курск, 2018. – С. 187-190.
11. Львович Я.Е. Исследование характеристик защищенности мобильных сенсорных сетей / Я.Е. Львович, И.Я. Львович, А.П. Преображенский, Ю.П. Преображенский, О.Н. Чопоров // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6-ти томах. Т. 2. – Воронеж, 2019. – С. 239-244.
12. Фрид А.И. Обеспечение целостности телеметрической информации о состоянии сложного технического объекта / А.И. Фрид, А.М. Вульфин, М.Б. Гузаиров, В.В. Берхольц // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 1.

13. Аветисян Т.В. Исследование математических моделей для оценок характеристик рассеяния полых структур / Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский, Ю.П. Преображенский // Прикладная физика. – 2023. – № 2. – С. 10-14.

14. Львович И.Я. Разработка алгоритма многокритериальной оптимизации дифракционных структур / И.Я. Львович, А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, А.В. Косых, Г.А. Тамбовцев // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2018. – Т. 8. – № 1. – С. 52-56.

15. Яуров С.В. Математическое моделирование сложных технологических систем методом конечных элементов / С.В. Яуров, А.Д. Данилов, К.Ю. Гусев, И.Н. Гусев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 3.

16. Щукин А.А. Проведение численных экспериментов для оценки характеристик обнаружения на математической модели радиолокационной станции / А.А. Щукин, А.Е. Павлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10. – № 1.

17. Бокова О.И. Формирование требований к защищенной информационно-телекоммуникационной инфраструктуре сети связи специального назначения / О.И. Бокова, С.В. Канавин, Н.С. Хохлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10. – № 1.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Аветисян Татьяна Владимировна**, преподаватель, Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [vtatyana\\_avetisyan@mail.ru](mailto:vtatyana_avetisyan@mail.ru)

**Львович Игорь Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, ректор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [office@vvt.ru](mailto:office@vvt.ru)

**Львович Яков Евсеевич**, доктор технических наук, профессор, президент, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [office@vvt.ru](mailto:office@vvt.ru)

**Преображенский Андрей Петрович**, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [app@vvt.ru](mailto:app@vvt.ru)

**Преображенский Юрий Петрович**, кандидат технических наук, доцент, проректор по информационным технологиям, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [petrovich@vvt.ru](mailto:petrovich@vvt.ru)