

Н.Н. Заблодский, В.Е. Плюгин, А.Н. Петренко

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Виконано аналіз застосовності принципів об'єктно-орієнтованого проектування в розробці і оптимізації електричних машин. Розглянуті об'єктно-орієнтовані моделі електричних машин, синтез яких здійснюється як на основі положень теорії електромагнітного поля, так і на основі диференціальних рівнянь електромагнітних перехідних процесів. Обґрунтовані переваги об'єктно-орієнтованого підходу в проектуванні. Визначені основні принципи об'єктно-орієнтованого проектування.* Бібл. 12, рис. 2.

*Ключові слова:* електрична машина, об'єктно-орієнтований, клас, об'єкт, шаблон, спадкоємство, ієрархія, проектування, математичне моделювання, електромагнітне поле, оптимізація, алгоритм.

*Выполнен анализ применимости теории объектно-ориентированного анализа в проектировании и математическом моделировании электрических машин. Рассмотрены объектно-ориентированные модели электрических машин, синтез которых осуществляется как на основе положений теории электромагнитного поля, так и на основе дифференциальных уравнений электромагнитных переходных процессов. Обоснованы преимущества объектно-ориентированного подхода в проектировании. Определены основные принципы объектно-ориентированного проектирования.* Библ. 12, рис. 2.

*Ключевые слова:* электрическая машина, объектно-ориентированный, класс, объект, шаблон, наследование, иерархия, проектирование, математическое моделирование, электромагнитное поле, оптимизация, алгоритм.

**Введение.** Разработка и модернизация электрических машин (ЭМ) с высокими технико-экономическими показателями является приоритетной задачей современных электромашиностроительных предприятий [1, 2]. Разработка новых модификаций ЭМ реализуется за счет индивидуального подхода к каждому проекту.

Однако, существующие методы проектирования, основанные на последовательной организации этапов проектирования, не позволяют реализовать задачи, связанные со следующим:

1) нет возможности автоматизированного переноса всего проекта или его части для создания нового, который имеет как общие признаки с базовым, так и свои собственные;

2) отсутствует механизм включения в существующий проект данных и зависимостей других проектов;

3) невозможно применять современные методы оптимизации, основанные на объектно-ориентированном представлении данных;

4) затраты ресурсов на проектирование при традиционном последовательном подходе значительно уступают объектно-ориентированным системам.

В связи с этим важной задачей является обоснование такой методики проектирования, которая позволит не только сократить сроки проектно-конструкторских работ, но также усовершенствовать процесс создания ЭМ благодаря переносу проектных методик из заранее сформированной базы данных на новую комбинацию узлов ЭМ.

В работах [3-6] были раскрыты принципы, методология и реализация объектно-ориентированного проектирования (ООП), математического моделирования и оптимизации ЭМ. В настоящей статье принципы объектно-ориентированного анализа (ОА) рассматриваются в реализации комплексного проекта ЭМ от расчета до оптимизации.

**Цель работы** – решение задачи повышения технико-экономических показателей ЭМ и сокращения сроков их разработки за счет применения ООП.

**Постановка задачи.** Традиционное проектирование сопровождается так называемым «процедурным» подходом к решению задач расчета электрической машины. Проект, построенный на основе процедурного метода, разделяется на расчетные блоки, каждый из которых выполняет некоторую законченную последовательность действий и имеет явно выраженные связи с другими блоками проекта. Расчеты разбиваются на последовательно выполняемые пункты с набором формул, жестко связанных между собой входными и выходными данными. Большое число связей между расчетными блоками и данными, в свою очередь, также порождает несколько проблем: во-первых, усложняется структура проекта; во-вторых, в проект становится трудно вносить изменения. Затраты на разработку таких проектов весьма существенны, что сказывается на дополнительных материальных затратах и повышению стоимости выпускаемой продукции. В связи с этим такая реорганизация проектирования ЭМ, которая бы позволила повысить эффективность разработки новых проектов, а также модификация существующих с минимальными ресурсными и временными затратами, имеет первостепенное значение в современном электромашиностроении.

Объектно-ориентированное проектирование реализует концепцию решения задач с использованием моделей, основанных на понятиях реального мира. Фундаментальными элементами являются класс и объект [7]. Классы позволяют выполнять конструирование из отдельных компонент, обладающих простыми инструментами. Объект при этом объединяет структуру данных (параметров с расчетными процедурами).

Основополагающей идеей ООП является объединение данных и действий, производимых над этими данными, в единое целое, которое называется объектом. В качестве примера на рис. 1 представлена структура ООП для двигателя постоянного тока.

Объектно-ориентированный проект можно представить, как «*электротехнический конструктор*»,

когда из отлаженных блоков собирается новая модификация ЭМ. Так, на рис. 2 показана ООП шнекового двигателя с массивным ротором, который составляется из модулей асинхронного двигателя (АД), машины с массивным ротором и шнека

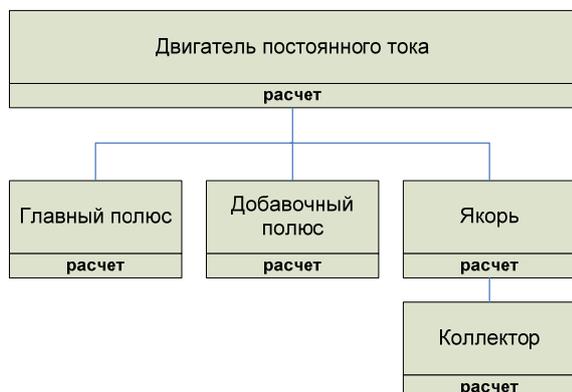


Рис. 1. Дерево наследования ДПТ в ООП

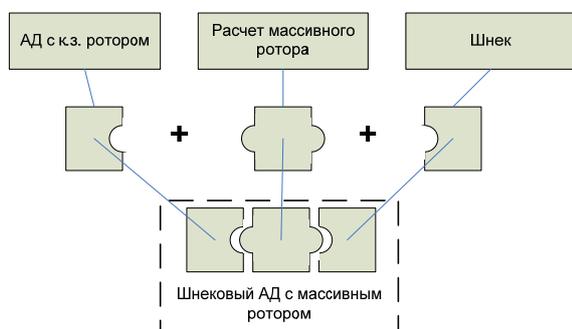


Рис. 2. Синтез ОО проекта шнекового АД с массивным ротором

Создание новых проектов при ООП, а также модификация существующих базируется на опыте предыдущих разработок, что приводит к значительному сокращению сроков разработки, снижает вероятность внесения ошибок в новый проект.

**Результаты исследований.** В ООП проект представляется в виде дискретных объектов, содержащих в себе данные и расчетные блоки с набором формул и логическими связями [3, 7]. Характеристиками и основными *принципами* построения объекта при этом являются: индивидуальность; классификация; наследование; полиморфизм.

Рассматривая теорию ООП, мы выходим из положения, предполагающего наличие базового класса обобщенного ЭМ, потомками которого являются известные виды ЭМ. Путем наследования, использующего рассмотренные принципы ООП, добавляются или отсекаются те признаки, которые приводят к синтезу конкретной модели ЭМ.

В качестве базовых, в терминах ООП, принимаются уравнения Максвелла классической электродинамики [8]:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho, \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В (1) векторы напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей связаны посредством соотношений:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2)$$

с векторами электрической  $\vec{D}$  и магнитной  $\vec{B}$  индукций, вектором плотности электрического тока  $\vec{J}$ , которые представляют собой отклик среды на наличие в ней электромагнитного поля. Соответственно,  $\rho$  – объемная плотность стороннего заряда,  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные,  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость, относительные диэлектрическая  $\varepsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемости среды.

Анализ выполненной работы показывает, что уравнения Максвелла (1) – (2), являющиеся основополагающими в теории ЭМ, полностью подтверждают заявленные принципы ООП, тем самым доказывая состоятельность объектно-ориентированного подхода в проектировании ЭМ. Таким образом, разработка теоретических основ ООП, кроме того, что повышает эффективность и качество проектирования, не противоречит принципам формообразования электромагнитных структур в ЭМ.

Практическая реализация ООП была выполнена на языке программирования Java [6]. В проекте были реализованы этапы проектирования, включающие в себя как электромагнитный расчет, так и тепловой, надежности, экономический.

Примененные объектно-ориентированные алгоритмы оптимизации, такие как Декартово произведение множеств (ДПМ) и генетический алгоритм (ГА), позволяют выполнить расчеты машины при всех возможных сочетаниях варьируемых переменных в заданных пределах и с заданным шагом при одновременном изменении варьируемых параметров [9, 10].

Для повышения эффективности работы алгоритма ДПМ процедура выборки комбинаций, прошедших проверку на ограничения, была модифицирована авторами, что повысило быстродействие работы алгоритма более чем в 10 раз [11].

Генетический алгоритм оптимизации в классической постановке был модифицирован и практически реализован авторами применительно к выборке данных ЭМ, а также с добавлением внесения изменений в диапазон варьируемых переменных без вмешательства во внутреннюю структуру алгоритма [12].

После завершения последнего этапа оптимизации, выполняется автоматизированное параметрическое проектирование оптимального электродвигателя в AutoCAD или КОМПАС с автоматической генерацией проектной и чертежной документации [6].

Принципы ООП дают возможность не только синтезировать методики проектирования ЭМ, но также рассматривать их математические модели в наследственной преемственности базового класса и классов-потомков. Это позволит подойти к проектированию как к комплексной задаче, решающей вопросы получения параметров и характеристик ЭМ в установившихся и переходных режимах работы. При этом выполняется автоматизированное генерирование математической модели произвольного вида ЭМ на этапе проектирования.

Система уравнений ЭМ базовой машины, описывает процессы преобразования энергии, состоит из четырех уравнений Кирхгофа, уравнений электромагнитного момента и движения. На основе анализа математических моделей различных типов ЭМ была составлена таблица модификаций, позволяющая генерировать их модели, используя принципы ООП. Синтез моделей ЭМ сопровождался формированием таблицы модификаторов, которые являются коэффициентами или слагаемыми, изменяющими матрицу параметров базовой математической модели [3].

Пользуясь классовым шаблоном обобщенного ЭМ и выбирая определенные признаки, можно перейти к объекту конкретного ЭМ [4]. Математическая модель переходных процессов при ООП формируется исходя из иерархического дерева наследования, таблиц модификаторов, составленных для проектируемой машины.

Практическая реализация ООП ЭМ подтверждается конкретным внедрением на промышленных предприятиях Украины.

Электродвигатель шнековый (ЭДШ), изготовленный на ОАО «Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса» был разработан и внедрен в производственный процесс смешивания и сушки угольного шлама на ОАО «ЦОФ Селидовская».

Для ЭДШ была составлена объектно-ориентированная методика проектирования, практически реализована на языке программирования Java, выполнено объектно-ориентированное математическое моделирование электромагнитных переходных процессов и анализ распределения электромагнитного поля.

С использованием принципов ООП были разработаны методика и компьютерная программа на языке Java для оптимального проектирования и исследования переходных режимов работы асинхронного двигателя для электроподвижного состава. Полученные результаты расчетов легли в основу полевых расчетов в 2D и 3D постановке с целью улучшения тепловых характеристик двигателя.

В качестве объекта проектирования также был рассмотрен возбудитель бесщеточный многофазный синхронный типа БТВ-12(15) (ГП «Электротяжмаш», г. Харьков) предназначенный для систем бесщеточного возбуждения турбогенератора (БВТГ) мощностью 80 МВт. Объектно-ориентированная классовая структура проекта БВТГ была реализована в программном виде на языке Java.

В качестве объекта проектирования был рассмотрен асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии АИР, разрабатываемый в ООО СКБ «Укрэлектромаш». В ходе выполнения работы было выполнено объектно-ориентированное проектирование, создана компьютерная программа на языке Java, выполнена многокритериальная оптимизация АД с применением алгоритм ДПМ. В результате оптимизации были получены параметры АД с КЗР, имеющие улучшенные, по сравнению с базовым вариантом, технико-экономические показатели.

Таким образом, методика ООП ЭМ была практически реализована в проектах, получивших практическое внедрение на промышленных предприятиях.

## Выводы.

1. Объектно-ориентированное проектирование позволило реализовать формирование проектных методик и математических моделей ЭМ благодаря использованию информации базовых классов проекта при помощи модификаторов и операторов синтеза. Унифицированный шаблон позволяет переносить наработанные данные проекта на новые модификации ЭМ.

2. Объектно-ориентированная методология математического моделирования ЭМ позволяет синтезировать математические модели как существующих типов ЭМ, так и прогнозировать возможные модификации новых структур.

3. Применение принципов ООП приводит к существенному сокращению сроков проектирования, возможности параллельно с инженерным проектированием выполнять оптимизацию, математическое моделирование электромагнитных переходных процессов и анализ распределения электромагнитного поля ЭМ в рамках одного проекта.

4. Применение объектно-ориентированных методов оптимизации позволило повысить такие технико-экономические показатели ЭМ, как КПД, себестоимость, коэффициент мощности, улучшить показатели пусковых и рабочих характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Expediting and validating development [Электронный ресурс] / Режим доступа к брош.: [www.iff.fraunhofer.de/en](http://www.iff.fraunhofer.de/en).
2. R-Designed [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://blog.caranddriver.com/r-designed-2016-volvo-xc90-gets-the-sporty-r-design-treatment-still-isnt-on-sale-yet/>.
3. Плюгин В.Е. Теоретические основы объектно-ориентированного расчета и проектирования электромеханических устройств. – Алчевск: Ладо, 2014. – 200 с.
4. Pliugin V., Milykh V., Polivianchuk A., Zablodskiy N. Using of object-oriented design principles in mathematic modeling of electric machines // MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. – 2015. – vol.15. – №2. – pp. 25-32.
5. Pliugin V., Shilkova L., Letl J., Buhr K. Analysis of the electromagnetic field of electric machines based on object-oriented design principles // Proceedings 36<sup>th</sup> PIERS. – Prague: Electromagnetic Academy. – 2015. – pp. 2522-2527.
6. Заблодский М.М., Плюгин В.Е., Бур К. САПР электромеханических устройств. – Навчальний посібник. – Алчевськ: Ладо, 2013. – Ч. 2. – 320 с.
7. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование. – М.: Бином, 1998. – 560 с.
8. Беляев Е.Ф., Шулаков Н.В. Дискретно-полевые модели электрических машин. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 457 с.
9. Верещагин Н.К., Шень А. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Начала теории множеств. – М.: МЦНМО, 2008. – 198 с.
10. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
11. Zablodskiy N., Pliugin V., Letl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor optimal design by use of cartesian product // Transactions on electrical engineering. – 2013. – №2. – pp. 54-58.
12. Zablodskiy N., Pliugin V., Letl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor design by use of genetic optimization algorithms // Transactions on electrical engineering. – 2013. – №3. – pp. 65-69.

## REFERENCES

1. Expediting and validating development. Available at: <http://www.iff.fraunhofer.de/en> (accessed 12 September 2015).
2. R-Designed. Available at: <http://blog.caranddriver.com/r-designed-2016-volvo-xc90-gets-the-sporty-r-design-treatment-still-isnt-on-sale-yet/> (accessed 12 September 2015).
3. Pliugin V.E. *Teoreticheskie osnovy ob'ektno-orientirovannogo rascheta i proektirovaniia elektromekhanicheskikh ustroystv* [Theoretical basis of electromechanical devices object-oriented calculation and design]. Alchevsk, Lado Publ., 2014. 200 p. (Rus).
4. Pliugin V., Milykh V., Polivianchuk A., Zablodskiy N. Using of object-oriented design principles in mathematic modeling of electric machines. *MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, 2015, vol.15, no.2, pp. 25-32.
5. Pliugin V., Shilkova L., Letl J., Buhr K. Analysis of the electromagnetic field of electric machines based on object-oriented design principles. *Proceedings 36<sup>th</sup> PIERS*. Prague: Electromagnetic Academy, 2015, pp. 2522-2527.
6. Zablodskii M.M., Pliugin V.E., Buhr K. *SAPR elektromekhanichnykh prystroiv. – Navchalnyi posibnyk. Ch.2* [CAD of electromechanical devices. – Textbook. Vol.2]. Alchevsk, Lado Publ., 2013. 320 p. (Ukr).
7. Buch G. *Ob'ektno-orientirovannyj analiz i proektirovanie* [Object-oriented analysis and design]. Moscow, Binom Publ., 1998. 560 p. (Rus).
8. Beljaev E.F., Shulakov N.V. *Diskretno-polevye modeli elektricheskikh mashin* [Discrete field models of electrical machines]. Perm, Perm State Technical University Publ., 2009. 457 p. (Rus).
9. Vereshhagin N.K., Shen' A. *Lekcii po matematicheskoy logike i teorii algoritmov. Nachala teorii mnozhestv* [Lectures on mathematical logic and theory of algorithms. Beginning of set theory]. Moscow, MCNMO Publ., 2008. 198 p. (Rus).
10. Emel'janov V.V., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. *Teorija i praktika evoljucionnogo modelirovanija* [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow, Phizmatlit Publ., 2003. 432 p. (Rus).
11. Zablodskiy N., Pliugin V., Letl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor optimal design by use of cartesian product. *Transactions on electrical engineering*, 2013, no.2, pp. 54-58.
12. Zablodskiy N., Pliugin V., Letl J., Buhr K., Khomitskiy S. Induction motor design by use of genetic optimization algorithms. *Transactions on electrical engineering*, 2013, no.3, pp. 65-69.

Поступила (received) 22.10.2015

Заблодский Николай Николаевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
 Плюгин Владислав Евгеньевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
 Петренко Александр Николаевич<sup>3</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> Национальный университет биоресурсов  
 и природопользования Украины,  
 03041, Киев, ул. Героев Обороны, 15,  
 тел/phone +38 044 5278242, e-mail: zablodskiyinn@gmail.com

<sup>2</sup> Национальный технический университет  
 «Харьковский политехнический институт»,  
 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
 тел/phone +38 057 7076600, e-mail: vlad.plyugin@gmail.com

<sup>3</sup> Харьковский национальный университет  
 городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,  
 61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17,  
 тел/phone +38 057 7061548, e-mail: petersanya2007@mail.ru

N.N. Zablodskii<sup>1</sup>, V.E. Pliugin<sup>2</sup>, A.N. Petrenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National University of Life and Environmental Sciences of  
 Ukraine,

15, Heroyiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine.

<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>3</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy  
 in Kharkiv,

17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

### Using of object-oriented design principles in electric machines development.

**Purpose.** To develop the theoretical basis of electrical machines object-oriented design, mathematical models and software to improve their design synthesis, analysis and optimization.

**Methodology.** We have applied object-oriented design theory in electric machines optimal design and mathematical modelling of electromagnetic transients and electromagnetic field distribution. We have correlated the simulated results with the experimental data obtained by means of the double-stator screw dryer with an external solid rotor, brushless turbo-generator exciter and induction motor with squirrel cage rotor. **Results.** We have developed object-oriented design methodology, transient mathematical modelling and electromagnetic field equations templates for cylindrical electrical machines, improved and remade Cartesian product and genetic optimization algorithms. This allows to develop electrical machines classifications models, included not only structure development but also parallel synthesis of mathematical models and design software, to improve electric machines efficiency and technical performance.

**Originality.** For the first time, we have applied a new way of design and modelling of electrical machines, which is based on the basic concepts of the object-oriented analysis. For the first time is suggested to use a single class template for structural and system organization of electrical machines, invariant to their specific variety. **Practical value.** We have manufactured screw dryer for coil dust drying and mixing based on the performed object-oriented theory. We have developed object-oriented software for design and optimization of induction motor with squirrel cage rotor of AIR series and brushless turbo-generator exciter. The experimental studies have confirmed the adequacy of the developed object-oriented design methodology. References 12, figures 2.

**Key words:** electric machine, object-oriented, class, object, template, inheritance, hierarchy, designing, mathematical modeling, electromagnetic field, optimization, algorithm.