

УДК 621.313

Г.В. Пуйло, д-р техн. наук, проф.,  
И.С. Кузьменко, магистр,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТНОГО СИНТЕЗА ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

*Г.В. Пуйло, І.С. Кузьменко. Концепція програмного забезпечення для дослідного проектного синтезу трансформаторів на основі інноваційних технічних рішень.* Обґрунтовано створення програмного забезпечення інваріантного до конструктивних особливостей трансформаторів. Представлені критерії якості цього програмного забезпечення.

*Г.В. Пуйло, И.С. Кузьменко. Концепция программного обеспечения для исследовательского проектного синтеза трансформаторов на основе инновационных технических решений.* Обосновано создание программного обеспечения инвариантного к конструктивным особенностям трансформаторов. Представлены критерии качества этого программного обеспечения.

*G.V. Puylo, I.S. Kuzmenko. The concept of the software for research design synthesis of transformers based on innovative engineering solutions.* The creation of software to the invariant structural features of transformers is grounded. The quality criteria of this software are presented.

Современные тенденции развития мирового и отечественного трансформаторостроения обусловили создание мощного научного базиса, новых видов электротехнических материалов, технологических процессов, инновационных технических решений, которые должны быть использованы как для совершенствования новых серий силовых трансформаторов, так и для модернизации трансформаторов, отработавших нормированный срок эксплуатации [1].

Эти достижения явились результатом интенсивного развития научных исследований в электротехнической отрасли, вообще, и в трансформаторостроительной, в частности, создания информационного, методического, математического и программного обеспечения автоматизации научных исследований, проектных разработок, оптимизации технических решений и технологических процессов производства трансформаторов [1, 2].

Наряду с этими достижениями следует отметить, особенно в последнее десятилетие, высокие темпы совершенствования вычислительной техники, создание мощных программных средств для эффективного численного эксперимента и анализа физических процессов, происходящих в трансформаторных устройствах при преобразовании электромагнитной энергии (электромагнитных, электрических, тепловых и механических полей), а также при решении проектных задач структурной и параметрической оптимизации в условиях жестких проектных ситуаций.

Однако указанные достижения и возможности совершенствования трансформаторов в большинстве случаев являются частичным достоянием отдельных исследовательских или промышленных фирм и пока в достаточной степени не используются в промышленных разработках и в массовом производстве серий силовых трансформаторов. Наряду с комплексом экономических, правовых и технологических факторов одной из существенных причин недостаточно широкого использования инновационных достижений в промышленном трансформаторостроении является отсутствие специального программного обеспечения для эффективного и оперативного решения задач исследовательского проектирования (ИП) трансформаторов на основе инновационных технологических и технических решений.

Процесс проектирования таких сложных объектов, как современные трансформаторы, принято делить на восемь стадий: проектные исследования, техническое задание, техническое

предложение, эскизный, технический, рабочий проекты, испытания, внедрение. Первые три стадии относятся к научно-исследовательским. Причем в жизненном цикле любой технической системы ИП — важнейшая и сложнейшая стадия, так как именно на этой стадии принимаются ответственные концептуальные решения, от которых зависят не только эффективность технологии ее создания и эксплуатации, но и ее выносимость.

Кроме того, на стадии ИП трансформаторов используются большие объемы самых разнообразных знаний и данных и, в первую очередь, о новых и новейших достижениях в данной области. На основе анализа научно-технических достижений и имеющихся ресурсов определяются основные принципы построения структуры трансформатора и создается параметрический базис проводимых исследований, формируется техническое задание, которое обуславливает реализацию последующих стадий создания трансформатора.

Основная проблема, решаемая на стадии ИП — определение структуры трансформатора, в котором обеспечивается оптимальное сочетание инновационных и традиционных технических решений.

Поэтому, если ПО традиционных конструктивных и технологических исполнений трансформатора строится как комплекс узкоспециализированных программных средств для решения задач проектирования вполне конкретных конструктивных типов трансформаторов, то к ПО ИП предъявляется прежде всего требование инвариантности к весьма широкому диапазону конструктивных исполнений данного класса. Кроме того, в соответствии с одним из основных принципов создания современных систем автоматизированного проектирования — принципом развития, ПО ИП должно обеспечивать возможность его совершенствования и модернизации в соответствии с темпами роста достижений в мировом трансформаторостроении.

Важнейшая задача ПО ИП состоит также в реализации обучающей функции, т.е. в создании эффективных возможностей изучения преимуществ и недостатков исследуемых технических и технологических решений как для опытных специалистов, так и в процессе подготовки молодых проектировщиков.

Таким образом, ПО ИП на основе инновационных технических и технологических решений для силовых трансформаторов должно соответствовать комплексу функциональных и эргономических требований.

Анализ и опыт эксплуатации известных САПР силовых трансформаторов [1, 3], а также имеющийся опыт разработки ПО для распределительных трансформаторов [3, 4] показал, что концепция создания ПО ИП должна основываться на системных принципах и реализовываться по дедуктивной схеме — от общих положений, принципов, функциональных требований и экономической ситуации к обобщенным инвариантным математическим моделям, обеспечивающим возможность синтеза оптимальных структурных решений с учетом инновационных технических решений по структурным компонентам и технологическим процессам их производства.

Обобщенная форма представления компонентов проектных математических моделей (ММ) может быть реализована в виде конечного множества функций-позиномов [4, 5]. Такие ММ обеспечивают компактное описание объекта проектирования с любой структурой, которое может быть развернуто до любого необходимого уровня детализации и одновременно обеспечивает унификацию алгоритмов и программного синтеза. Их преимущество также в инвариантности: возможности охвата достаточно широкого диапазона возможных типополноценных конкретного класса трансформаторных устройств. Такая концепция создает возможности автоматизированного синтеза ММ различных структурных решений магнитных систем и обмоток трансформаторов на основе базиса исходных данных и технических требований и их функционального сочетания в синтезируемом техническом решении.

Программная реализация рассмотренных положений обуславливает необходимость повышения требований к качеству ПО ИП. Особенно учитывая то обстоятельство, что, как правило, каждая научно-исследовательская организация самостоятельно разрабатывает средства ПО ИП. Эта эргономическая проблема заслуживает специального анализа.

Разработка ПО для автоматизации процессов, существующих на стадии проектирования электромеханических устройств, в последнее время претерпевает ряд качественных изменений,

направленных на улучшение производительности, увеличение набора существующих функций, которые может выполнять приложение, переход от модульного к объектно-ориентированному программированию и т.д.

Нередко изменения, связанные с добавлением программного кода, усложнением структуры приложения, приводят к ухудшению качества ПО, что непременно сказывается не только на удовлетворенности пользователя, но и на правильности конечных результатов [6...8].

Отсутствие четких критериев оценки качества, стремление усилить функциональность, закрыв глаза на внешний вид, попытка уйти от учета всех необходимых коэффициентов при расчете тех или иных показателей, непременно приводит к усложнению использования ПО.

Также нередко встречается отсутствие возможности правильного сохранения пользовательских данных при сбоях, неправильное использование системных ресурсов (загрузка слабых процессоров, оперативной памяти), отсутствие хорошей документированности, жесткого контроля системных и пользовательских ошибок и др.

Поэтому можно составить приближенный список требований, которые предъявляет проектировщик к ПО. Требования приведены в порядке важности:

- хорошая производительность,
- отсутствие ошибок,
- легкость использования (удобный интерфейс),
- хорошая документированность,
- легкое добавление новых возможностей,
- возможность использования на различных платформах.

Все эти требования выделяют характеристики, важные для конкретного пользователя, разработчика ПО или группы таких лиц. Однако, для повышения степени удовлетворения всех пользователей ПО важен учет всей совокупности его характеристик, важных не только для проектировщика, но и для разработчика [9].

Приведенные требования показывают, что качество ПО может быть описано большим количеством разнородных характеристик. Значит, понятие качества программы — многоплановое и может быть выражено адекватно только некоторой структурированной системой характеристик или атрибутов. Такая система характеристик называется моделью качества.

В 1991 г. в качестве стандартной была принята модель качества ПО ISO 9126 [9, 11], которая не является прямым расширением ранее предложенных. В ней оценка качества ПО основана на трехуровневом рассмотрении:

- цели — то, что мы хотим видеть в ПО,
- атрибуты — свойства ПО, показывающие приближение к целям,
- метрики — количественные характеристики степени наличия атрибутов [9, 10].

Выделено 6 целей: функциональность, надежность, практичность, эффективность, сопровождаемость, переносимость. Цели подразделяются на 21 атрибут качества.

В 2001 г. этот стандарт был пересмотрен и расширен [10]. В него было добавлено 6 дополнительных атрибутов качества: привлекательность как атрибут практичности и степень соответствия стандартам для каждой из целей, кроме функциональности.

Исходя из перечисленных факторов, приложение для расчета и проектирования трансформаторов, помимо основных функций (все процессы проектирования, расчета и оптимизации трансформаторов), должно сочетать в себе набор стандартных пользовательских функций, простоту и удобство в использовании, и отвечать основным условиям качественного программного обеспечения.

В соответствии с функциональными требованиями и основным системными принципами разработано приложение для обеспечения автоматизированного анализа и синтеза однофазных и трехфазных трансформаторов.

Разработанное приложение позволяет выполнить проектный синтез и анализ, а также различные технические расчеты для трансформатора с различной формой стержня и ярма.

Приложение ориентировано на пользователя, не имеющего специальной подготовки в области программирования, но обладающего достаточными знаниями в области проектирования трансформаторов.

Положенные в основу расчета ММ инвариантны к структуре составных частей магнитной системы трансформатора, позволяя провести расчет и исследования для различных структур магнитных систем (плоских и пространственных), учитывая технические и экономические критерии.

Высокоуровневая структура приложения представлена на рис. 1.

Рассмотрим составные части каждого из приведенных блоков.

На этапе подготовки исходных данных пользователь заносит значения необходимых величин, осуществляет выбор типа магнитной системы, формы площади стержня и ярма, напряжения и мощности обмоток, изоляционных расстояний и т.д. Также на этапе подготовки данных предусмотрена возможность создания собственных типов сталей и проводов для дальнейшего их использования во всех проектах.

В базе данных хранятся таблицы свойств всех предопределенных сталей, проводов, размеров пакетов стержней, промежуточные данные, необходимые для использования в отчетах, графиках.

Контроль вводимых данных осуществляется на этапе подготовки.

Поскольку задание всех исходных данных — процесс весьма трудоемкий, то предусмотрена возможность сохранения вводимых пользователем данных в базе для их последующего изъятия при необходимости.

Ядро программы содержит набор модулей, каждый из которых представляет описание той или иной математической модели. Каждый из модулей выполняет часть расчета, что облегчает логику приложения, если проектировщику не требуется выполнять все расчеты, а, например, только магнитный и тепловой расчеты.

Математические модели, задействованные в разработке ПО, инвариантны к форме поперечного сечения стержня и ярма, типу магнитной системы, количеству концентраторов и т.д., что позволяет, при минимуме исходных данных, решать множество задач проектирования.

Приложение позволяет выполнять оптимизационный расчет количества обмоток больше двух (максимальное число обмоток ограничено конструктивными требованиями), а также использовать различные материалы обмоток одновременно. Приложение также позволяет выполнять проектирование высокочастотных трансформаторов.

На рис.2 приведен список основных модулей, которые использует ядро приложения.

Логикой модулей управляет платформа приложения (см. рисунок 1).

После выполнения соответствующих расчетов модуль передает необходимые данные в таблицы расчетов и, при необходимости, они используются любым модулем.

Разделенность модулей позволяет использовать различную логику при расчете, а также получать данные практически на любой стадии проектирования.

Помимо выполнения основных расчетов, основанных на предопределенных математических моделях, предусматривается возможность добавления новых сталей и номенклатуры проводов к уже существующим таблицам данных. Добавленные таблицы будут автоматически использованы в соответствующих модулях.

Приложение обладает основным набором функций, которые необходимы проектировщику для комфортной работы, как-то: сохранение в различные форматы, печать результатов, удаление старых данных и т.д.

Внешний вид панели инструментов, обеспечивающих доступ к модулям приложения, представлен на рис. 3.

Используя мастер подготовки данных для проекта, пользователь задает значения напряжений и мощностей обмоток, выполняет выбор стали для стержня и ярма, формы стержня и ярма,

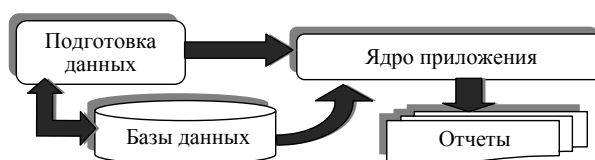


Рис. 1. Структура приложения

материала каждой обмотки, необходимых экономических и конструктивных коэффициентов, а также изоляционных расстояний. В мастере наглядно представлены характеристики каждой из сталей, внешний вид соответствующей магнитной системы, схем соединений и положения обмоток в окне.

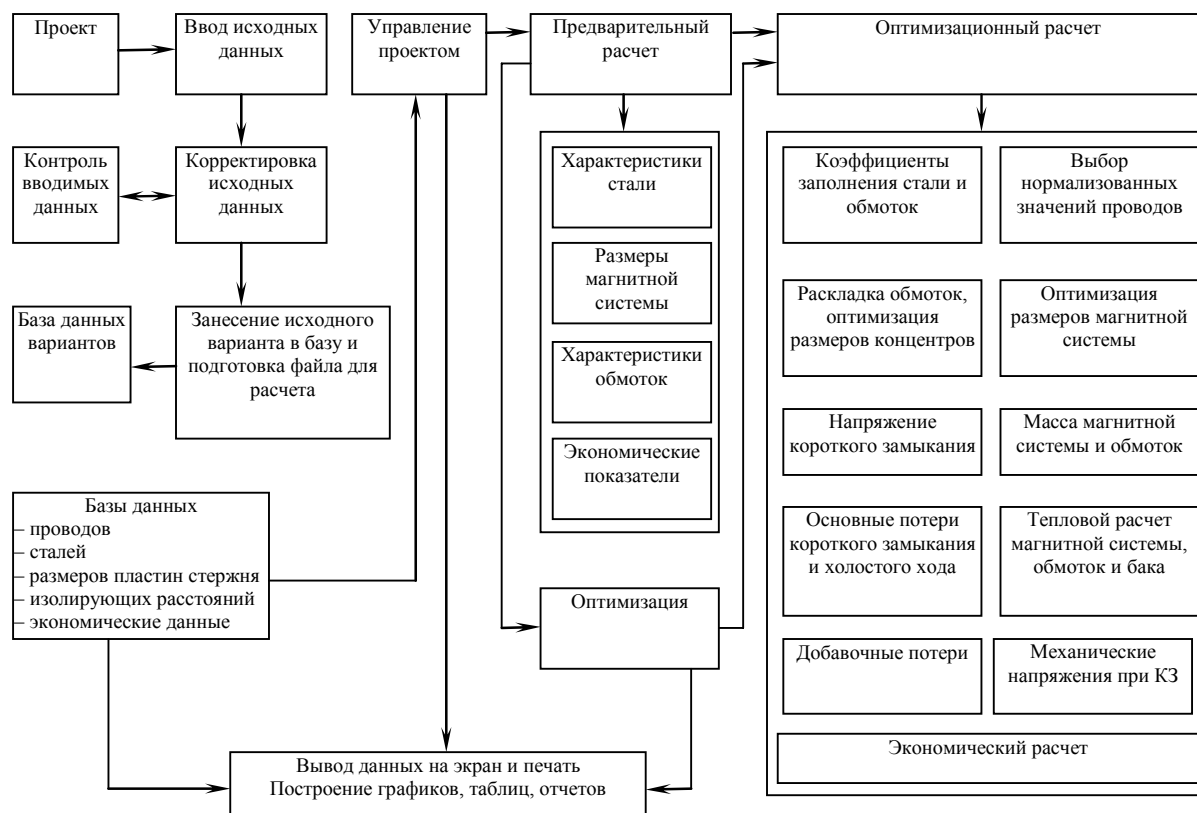


Рис. 2. Основные модули приложения и их логические связи

После подготовки проекта пользователь может решить оптимизационную задачу вручную, т.е. задать ряд критериев оптимизации (капитализированные затраты, минимум массы обмотки, наибольший коэффициент заполнения обмотки и т.д.) и, основываясь на полученных данных, выбрать наиболее подходящий вариант. Также предоставляется возможность возложить выполнение задачи оптимизации на приложение. Поиск оптимального решения осуществляется методом покоординатного спуска.

Наиболее сложными в реализации и, соответственно, требующими творческого подхода являются задачи выбора технических решений, влияющих на детальный расчет параметров трансформатора и синтеза обмоток. На данном этапе пользователю предстоит определить, бу-

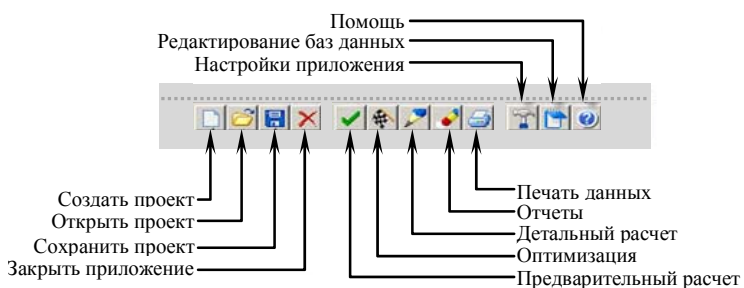


Рис. 3. Внешний вид панели инструментов приложения

дут ли использоваться жесткие рамки критериев, или же, в случае выхода расчетных данных за пределы допустимых значений, приложение ограничится предупреждающим, а не останавливающим работу, сообщением.

После выполнения предварительного и детального расчета пользователь может провести необходимые исследования и отобра-

зить полученные данные в виде таблиц или графиков.

В качестве критериев используются обобщенные показатели экономической эффективности трансформатора в целом. Это массы и стоимости стали и обмоток, суммарные потери, технологические коэффициенты, оптимальные соотношения размеров стержня и размеров проводников обмоток.

Ограничениями являются величина напряжения короткого замыкания, тепловые нагрузки и механические напряжения.

В настройках приложения пользователь может задать тип представления данных, настроить вид приложения, изменить шрифты и способы отображения графиков, а также включить или отключить контроль полученных данных, тем самым предоставив себе более обширную площадь для исследований.

Полученная в результате работы информация может быть сохранена в формате Microsoft Excel (\*.xls), Adobe Acrobat (\*.pdf) или выведена на печать.

Приложение разработано в интегрированной среде Delphi 7 и предназначено для работы в операционной среде Windows XP.

Отличие предлагаемого приложения от уже существующих состоит в следующих факторах:

- инвариантность математических моделей;
- возможность синтеза структуры трансформатора с различными техническими решениями для магнитной системы и обмоток;
- возможность параметрической оптимизации каждого структурного решения;
- возможность наглядно выявлять преимущества и недостатки различных технических решений, выполнять сопоставление структурных вариантов с оптимизированными параметрами;
- простота и удобство в использовании. Возможность выполнения синтеза и анализа новых технических решений или их сочетаний;
- реализация системного принципа (дедукции) — от общей постановки задачи, целей, технических требований к детальной проработке;
- продуктивный подход при оценке инновационных технических решений.

## Литература

1. Обзор программного обеспечения ОАО “ВИТ”, разработанного за последние 5 лет / А.В. Артемченко, В.И. Вороненко, В.А. Желавин и др. // Трансформаторостроение - 2005: Тез. докл. XI междунар. науч.-техн. конф. — Запорожье: ОАО ВИТ; ОАО НИЦ “ЗТЗ-Сервис”, 2005. — С. 70 — 72.
2. Пуйло, Г.В. Математическая модель силового трансформатора, инвариантная к форме поперечного сечения магнитной системы / Г.В. Пуйло, И.С. Кузьменко // Електромашинобудування та електрообладнання: міжвід. наук.-техн. зб. — Вып. 71. — К.: Техніка, 2008. — С. 56 — 60.
3. Липаев, В.В. Обеспечение качества программных средств. Методы и стандарты / В.В. Липаев. — М.: Синтез, 2001. — С. 12 — 14.
4. Пуйло, Г.В. Обобщенная математическая модель для синтеза и анализа силовых трансформаторов со слоевыми обмотками / Г.В. Пуйло, Е.В. Трищенко // Електротехніка і електромеханіка. — 2005. — Вып. 2. — С. 42 — 45.
5. Пуйло, Г.В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов / Г.В. Пуйло, И.С. Кузьменко, В.В.Тонгалюк // Електротехніка та Електромеханіка. — 2008. — № 2. — С. 48 — 52.
6. Богданова, Е.В. Программное обеспечение расчетов трансформаторов / Е.В. Богданова, В.Ф. Иванов, Ю.Н. Шафир // Трансформаторостроение – 2005: Тез. докл. XI междунар. науч.-техн. конф. — Запорожье: ОАО ВИТ, ОАО НИЦ “ЗТЗ-Сервис”, 2005. — С. 56 — 60.
7. Пуйло, Г.В. Подсистема автоматизированного синтеза силовых трансформаторов со слоевыми обмотками / Г.В. Пуйло, Д.М. Левин, А.В. Трищенко // Електротехніка та Електромеханіка. — 2008. — № 1. — С. 49 — 53.
8. В.В. Кулямин, О.Л. Петренко; ИСП РАН. — Место тестирования среди методов оценки качества ПО [Электронный ресурс]. // (<http://software-testing.ru/library/testing/general-testing/117>). — 25.03.10.

9. Characteristics of Software Quality / B.W. Boehm, J.R. Brown, H. Kaspar and others. — North Holland, 1978. — 86 p.
10. ISO/IEC 9126-1. Software engineering – Software product quality. — Part 1: Quality model. — Geneva, Switzerland: Intern. Organization for Standardization, 2001.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Герасимьяк Р.П.

Поступила в редакцию 11 мая 2010 г.