

## ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СЛОЕВЫМИ ОБМОТКАМИ

Пуйло Г.В., д.т.н., проф., Левин Д.М., Трищенко А.В.  
Одесский национальный политехнический университет  
Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко 1, ОНПУ, кафедра электрических машин  
тел. (0482) 288-680, E-mail: puilo@ukr.net

*Розглянута концепція розробки, структура і функціональні можливості підсистеми автоматизованого проектного синтезу та оптимізації трифазних силових масляних трансформаторів з шаровими обмотками та різними типами магнітних систем - "Аметист".*

*Рассмотрена концепция разработки, структура и функциональные возможности подсистемы автоматизированного синтеза и оптимизации трехфазных силовых масляных трансформаторов со слоевыми обмотками и различными типами магнитных систем - "Аметист".*

Силовые трансформаторы со слоевыми обмотками являются самыми распространенными и их количество составляет не менее 45% от всех используемых силовых трансформаторов в электроэнергетике.

Поэтому трансформаторная промышленность всего мира в последние годы направляет значительные средства на их совершенствование. Это реализуется путем улучшения конструктивного исполнения обмоток, применения новых трансформаторных сталей, новых конструктивных типов и технологий изготовления магнитных систем, оптимизации параметров и структуры трансформаторов в соответствии с требованиями энерго- и ресурсосбережения [5,6].

Задача оптимального проектного синтеза таких трансформаторов является задачей структурно-параметрической оптимизации и требует учета конструктивных и технологических факторов, требований унификации и стандартизации при удовлетворении всех необходимых функциональных показателей.

Поэтому программные продукты для автоматизированного проектирования таких объектов должны обеспечивать решение задач прогнозирования проектных решений, анализа тенденций развития и построения перспективных объектов, выбора оптимальных или допустимых технических решений, управления процессами проектного синтеза и анализа. Эффективное решение этих задач основывается на системной организации функционирования компонентов программного обеспечения исходя из системных принципов развития, системного единства, моральной живучести, эргономичности, рациональной декомпозиции, информационной наглядности.

В [6] выделено около 20 свойств, высококачественного программного обеспечения. Этими свойствами обеспечивается его общая полезность, которая складывается из таких качеств как "исходная полезность" и "удобство в эксплуатации".

Наиболее существенными показателями качества ПО принято считать эффективность, надежность, точность, доступность, информативность, расширяемость, эргономичность, модифицируемость.

Постоянно растущие вычислительные мощности и другие возможности современных ЭВМ, прогресс сервисных программных продуктов позволяют реали-

зовать свойства высококачественного программного обеспечения в прикладных программных комплексах автоматизированного проектирования сложных технических объектов при учебном и промышленном проектировании.

В соответствии с функциональными требованиями и указанными системными принципами подсистема автоматизированного синтеза силовых масляных трехфазных трансформаторов "Аметист", разработанная в Одесском национальном политехническом университете, организована по блочному (структурно-модульному принципу) (рис. 1) и содержит такие основные блоки: модуль исходных данных, модуль предварительного оптимизационного расчета, модуль синтеза слоевых обмоток, модуль математических моделей магнитных систем, модули баз данных обмоточных проводов и электротехнических сталей, модуль расчета магнитного поля рассеяния, модули визуализации процесса проектной оптимизации, модули расчета и визуализации характеристик трансформатора в статическом и переходном режимах работы.

Интерактивное взаимодействие пользователя с подсистемой осуществляется на основе системы диалоговых окон, которые активизируются в соответствии с логической схемой решения проектной задачи.

Наиболее творческими и трудноформализуемыми этапами проектного синтеза и анализа являются этапы синтеза технических решений, оптимизации структуры и параметров трансформатора, детального синтеза оптимальных обмоток.

Для повышения наглядности и эффективности решения задач этих этапов в интерактивном режиме в подсистеме предусмотрены специальные окна. На рис.2 показано, например, окно "Выбор оптимального варианта", с помощью которого выполняется анализ допустимой области с ограничениями  $(\sum P = const, P_o = const, P_k = const, B_c = const)$ .

При проектном синтезе магнитных систем каждый из конструктивных видов представляется в трехмерном изображении. Наглядно представлены как разрезы главной изоляции в окне, так и схемы размещения элементарных проводников в поперечных сечениях витков обмоток (рис. 3).

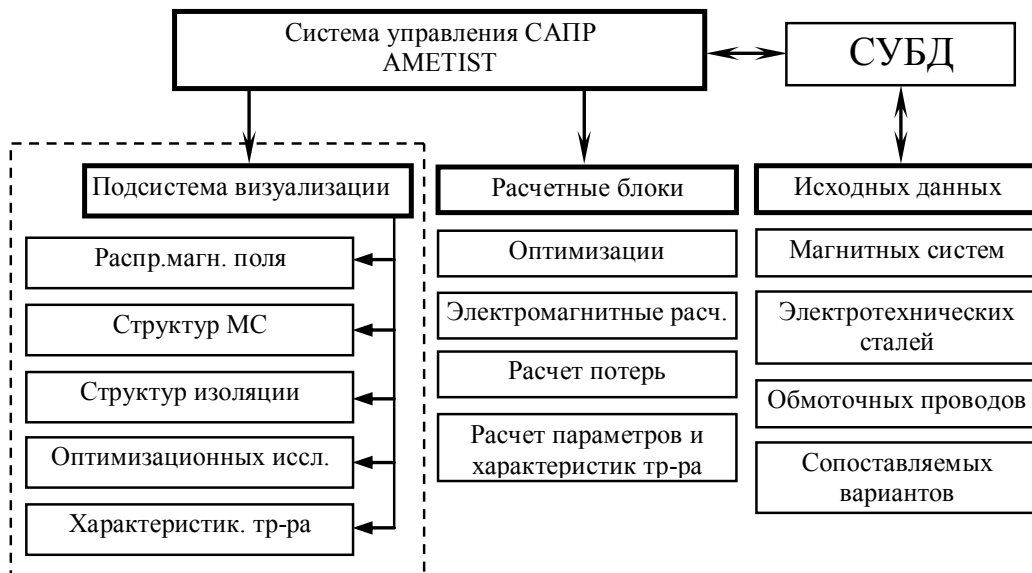


Рис. 1. Состав программных компонентов подсистемы "Аметист"

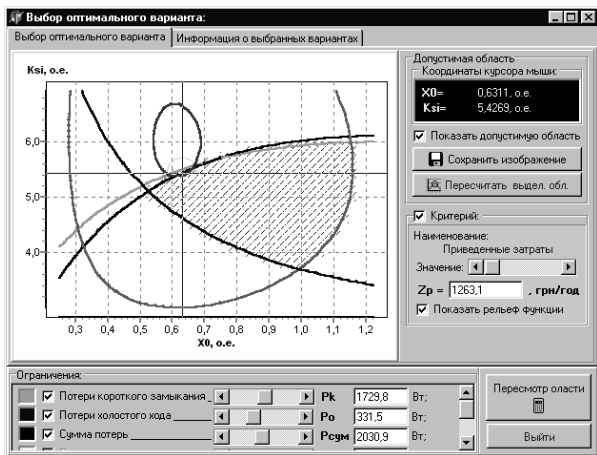


Рис. 2. Окно "Выбор оптимального варианта" при условной оптимизации

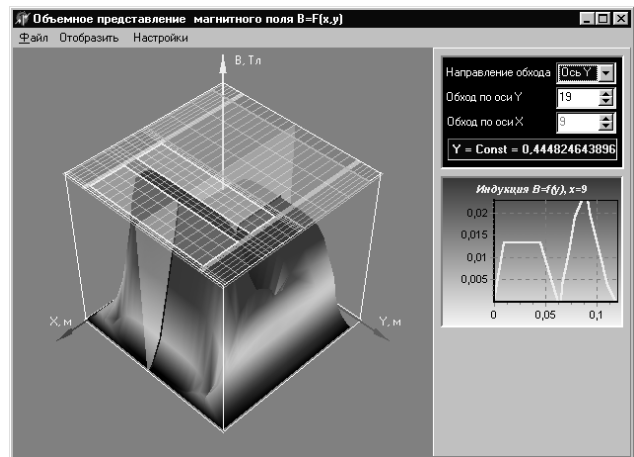


Рис. 4. Окно объемного представления магнитного поля рассеяния

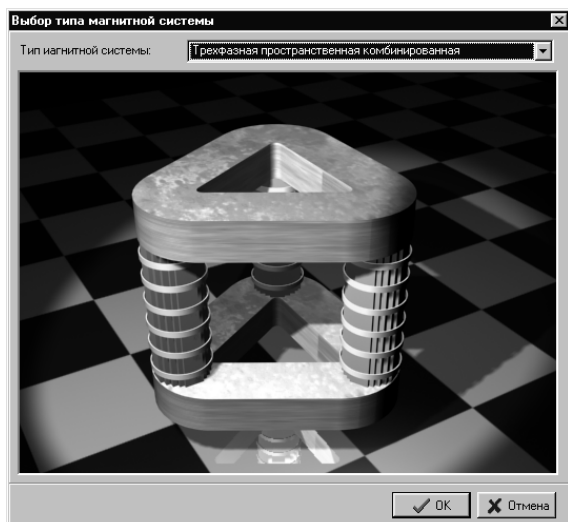


Рис. 3. Окно выбор магнитной системы

Распределение магнитного поля рассеяния в окне трансформатора рассчитывается методом конечных разностей и для удобства анализа представляется как в объемном изображении, так и в любой заданной плоскости сечения в пространстве "окна" (рис. 4).

Характеристики трансформатора представлены в графическом виде и с помощью курсора "мыши" легко выполняется анализ влияния на них изменения параметров трансформатора (рис. 5).

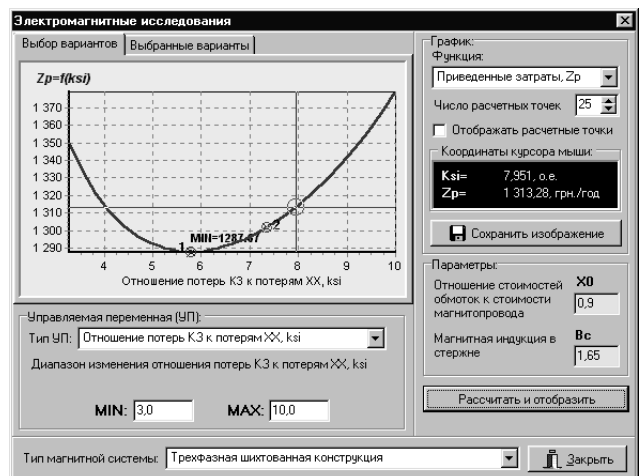


Рис. 5. Окно "Выбор оптимального варианта" при безусловной оптимизации по одной УП

Арсенал современных методов оптимизации и реализованных подходов к решению такой задачи достаточно обширен. В [3], например, указано семь различных подходов к решению задачи оптимального проектирования асинхронных машин. Известны более десяти различных подходов к проектному синтезу трансформаторных устройств.

При разработке подсистемы "Аметист" концепция организации процесса синтеза трансформаторов основывалась на двух принципах: обеспечение в спроектированных трансформаторах современных требований ресурсо- и энергосбережения и обязательное обеспечение всех технических норм и функциональных требований. Потому при разработке проектных математических моделей в качестве управляемых переменных выбраны как электромагнитные нагрузки (плотности токов обмоток и индукция в магнитной системе), так и переменные, характеризующие ресурсо-энергетические показатели трансформатора – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода ( $\xi$ ) и отношение стоимостей обмоток к стоимости магнитной системы ( $x$ ).

С учетом этих переменных разработана обобщенная математическая модель, инвариантная к структуре обмоток для предварительного определения основных геометрических размеров и параметров трансформатора в зоне их оптимальных значений для заданного критерия.

В качестве критериев используются обобщенные показатели экономической эффективности трансформатора в целом (затраты на трансформацию электроэнергии  $C_{i0}$ , масса (или стоимость) активных материалов  $C_a$ , суммарные потери  $\sum P$ ), и частные проектные критерии, показатели конструктивного и технологического совершенства обмоток и магнитных систем (коэффициенты заполнения площадей сечения обмоток  $\phi_k$  и магнитных систем  $\phi_o$ , эффективности использования свойств электротехнических сталей  $q_y, \beta_y$ , оптимальные соотношения конструктивных размеров элементов трансформатора, коэффициент "недохода" проводников в последнем слое ВН) [2,5].

В качестве обязательных ограничений учитываются величина напряжения короткого замыкания, перегрев обмоток, механические напряжения в обмотках, класс нагревостойкости и размеры главной изоляции.

Процесс синтеза разделяется на три этапа:

1. Предварительный оптимизационный расчет и определение совместимости технических требований. На этом этапе проверяется совместимость заданных технических требований и определяются основные геометрические размеры магнитной системы (заданной структуры), основные размеры обмоток трансформатора для заданной марки электротехнической стали, типа обмоточного провода в зоне оптимума заданного критерия.

На этом же этапе выполняется проектный анализ влияния свойств применяемых марок электротехни-

ческой стали, материала обмотки и толщины изоляция обмоточного провода, величины напряжения короткого замыкания, отношения потерь ( $\xi$ ) и стоимостей обмоток и магнитной системы ( $x$ ), стоимостей потерь, обмоточных проводов и электротехнических сталей на геометрические размеры и параметры трансформаторов, оптимизированных по критерию затрат на трансформацию электроэнергии, стоимости активных материалов, суммарным потерям.

Результаты проектного анализа и оптимизации параметров трансформатора, полученные на первом этапе, являются исходными для детального синтеза трансформатора на втором этапе.

2. Детальный синтез обмоток на основе данных предварительной оптимизации и выбор обмоточных проводов с оптимальными типоразмерами из заданной их номенклатуры (сортамента).

Синтез обмоток трансформатора из стандартных проводов выполняется автоматически методом рационального перебора на основе таких конструктивных критериев как максимальное заполнение площади обмотки проводниковым материалом и максимальное заполнение последнего слоя обмотки ВН регулировочными витками.

Число концентров обмоток выбирается из условия обеспечения допустимой тепловой нагрузки. Площади сечения витков обмоток определяются в соответствии с рассчитанными на первом этапе оптимальными значениями плотности тока, а расположение элементарных проводников в сечении витка (структура витка) выбирается из набора допустимых по технологическим требованиям структур.

Выбор элементарных проводников из сортамента и формирование сечения витка ограничиваются условиями вписывания синтезированной обмотки из стандартного провода в предварительно определенные её размеры, обеспечивающее заданную величину напряжения короткого замыкания, для чего предусмотрена специальная вычислительная процедура (рис. 6).

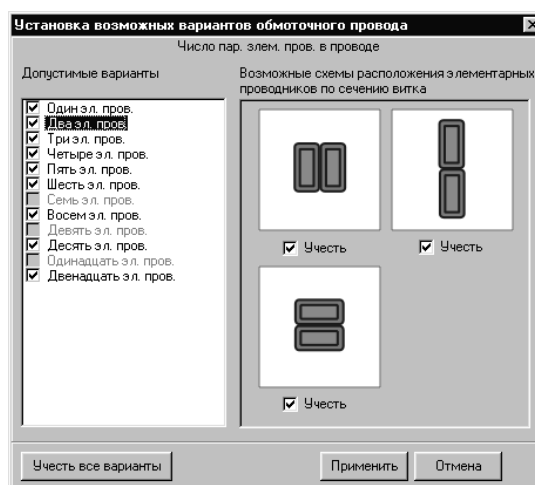


Рис. 6. Окно установки допустимых структур сечения витка из прямоугольного провода

В результате автоматизированного синтеза ПЭВМ предлагает проектировщику, как правило, не-

скольким приемлемым вариантам, (при жестких технологических ограничениях), из которых он выбирает окончательный, либо ПЭВМ выполняет выбор оптимального варианта автоматически.

По данным детального синтеза обмоток определяются коэффициенты заполнения площади сечения в "окне" проводниковым материалом и при необходимости уточняются значения этих коэффициентов в предварительном оптимизационном расчете и расчет повторяется.

3. Перебор структур магнитных систем и выбор оптимальной по заданному критерию.

В принципе эта проектная задача приближенно решается уже на первом этапе. Однако на третьем этапе более точно учитывается дискретность строения обмоток, магнитной системы и рассчитываются удельные показатели использования свойств электро-технической стали в каждом конструктивном исполнении магнитной системы.

При необходимости уточняются оптимальные значения электромагнитных нагрузок и удельных показателей.

Для повышения эффективности интерактивных режимов при решении проектных задач в подсистеме "Аметист" предусмотрена система диагностики типовых причин несовместимости технических и технологических требований при оптимизации и детальном синтезе трансформаторов, которые могут возникнуть в некоторых проектных ситуациях. Информация о 10 возможных причинах такой несовместимости представляется на дисплее в виде текстовых сообщений и по существу содержит подсказку о возможностях разрешения возникающих противоречий.

Использование подсистемы "Аметист" в течении 2-х лет в учебном проектировании и для решения научно-технических задач показало ее высокую эффективность, соответствие требованиям к качеству современных программных комплексов, так как позволило примерно вдвое сократить затраты времени на решении сложных проблем проектного синтеза, анализа и оптимизации трансформаторов за счет высокого уровня наглядности, эффективного интерактивного режима и оперативности решения проектных задач.

Информация о результатах проектных исследований и проектного синтеза выдается на печать в виде текста, таблиц, графиков в одно и двухмерном изображении, рисунков в двухмерном и трехмерном изображении.

Программный продукт "Аметист" разработан в интегрированной среде Delphi 6, Для визуализации магнитного поля использована технология визуализации OpenGL

Программный продукт "Аметист" предназначен для работы в операционных средах Windows 95Os/98/2000/XP.

## ВЫВОДЫ

1. Системная организация и визуализация процессов автоматизированного проектирования трансформаторных устройств обеспечивает эффективную оптимизацию структуры обмоток и магнитной системы

по критериям затрат на трансформацию электроэнергии и энергосбережения.

2. Подсистема "Аметист" по своим функциональным возможностям является эффективным инструментом проектного синтеза и анализа силовых масляных трансформаторов при решении задач оптимального проектирования и проектных исследований, как при учебном проектировании, так и при исследовании перспективных направлений совершенствования трансформаторов.

3. Система "Аметист" разработана как открытая система, легко дополняемая модулями новых конструктивных видов магнитных систем и обмоток трансформаторов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кустов С.С. Основные направления развития конструкций трансформаторов I-II габаритов. Электрические станции, 1995, №8.
- [2] Пуйло Г.В. Использование особенностей математических моделей трансформаторных устройств при их оптимальном проектно синтезе. Техническая электродинамика, тематический выпуск № 5, 2000г, с. 11-12.
- [3] Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
- [4] П.М. Тихомиров. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 526 с.
- [5] Мелешко Ю.И. Оптимизация трансформаторного оборудования по экономическим нормам. // Техническая Электродинамика. – 1992. -№2, с. 57.-64.
- [6] Боэм Б., Браун Дж., Каснар Х., и др. Характеристики качества программного обеспечения, М.: Мир, 1981. – 208 с.
- [7] Вермишев Ю.Х. Методы автоматизированного поиска решений при проектировании сложных технических систем М.: Радио и связь., 1982 – 152 с.
- [8] Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003 – 560с.: ил.

*Поступила 5.10.2003*