

**В.В. Александров, В.И. Самулев, М.Г. Тылес**  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»  
**М.А. Метельков, Р.А. Слугин**  
Волго-Вятский филиал МТУСИ

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Правильное представление особенностей режимов перемагничивания сердечников электромагнитных элементов в любом, создаваемом вновь, устройстве преобразовательной техники, несомненно, является желанием каждого инженера-разработчика. Весьма часто за счет использования специфики этих процессов удается повысить массогабаритные показатели и надежность устройства в целом.

Разработка методологии и программного обеспечения для моделирования с использованием ПЭВМ любых режимов перемагничивания действительно целесообразна, что явилось содержанием данной работы.

Для решения этой задачи использована разработанная нами *логиико-аналитическая макромодель* перемагничивания сердечников из ферромагнитных материалов с учетом их нелинейных свойств [1]. Отметим ее особенности.

Модель способна работать во всем допустимом диапазоне изменения магнитной индукции  $(-B_s; +B_s)$ . Она представлена в виде зависимости  $H(B)$ , поскольку именно индукция  $B$  используется в качестве одной из переменных состояния при анализе динамических процессов в импульсных преобразовательных устройствах.

Известно, что любая траектория перемещения рабочей точки, характеризующей «текущее» магнитное состояние сердечника, располагается в зоне, ограниченной ветвями гистерезисного участка симметричного (относительно начала координат) предельного цикла перемагничивания, вершины которого находятся в зоне насыщения. Точки с координатами  $(BMS$  и  $HMS$ ,  $-BMS$  и  $-HMS)$ , ограничивают гистерезисный участок предельного цикла.

Вид предельного цикла, координаты его характерных точек  $(B_S$  и  $H_S; B_R; H_C)$  и начальная магнитная проницаемость  $\mu_{нач}$  (паспортный параметр материала) приводятся в справочниках. Именно эти справочные данные используются в модели, что является несомненным достоинством ее. Ветви предельного цикла используем в модели как «опорные» кривые и аппроксимируем. Поэтому коэффициенты аппроксимации для расчетных выражений модели определяются только на основе справочных данных. Сформирована *база данных* со значениями этих коэффициентов для магнитодиэлектриков (ферритов и МО-пермаллоев) шести различных марок.

Другим достоинством модели является воспроизведение в ней основных закономерностей перемагничивания, которые экспериментально установил Е. Моделунг [2] и сформулировал в виде следующих правил:

- 1) ход любой частной траектории перемещения рабочей точки, называемой «кривой» или ветвью намагничивания (восходящей или нисходящей), однозначно определяется точкой поворота направления намагничивания, являющейся ее началом;
- 2) если какую-либо точку произвольной «кривой» намагничивания сделать точкой поворота, то определяемая этой точкой поворота новая частная траектория «придет» в предыдущую точку поворота (условие замкнутости цикла перемагничивания);
- 3) продолжение любой кривой за точку поворота, замыкающую частный цикл, совпадает с продолжением предшествующей этому циклу кривой, как если бы част-

ный цикл вовсе не был осуществлен, а намагничивание непрерывно проводилось по предшествующей кривой.

Алгоритм описываемой модели перемагничивания предполагает, что:

– все ветви гистерезисных циклов являются направленными, и потому всегда можно указать «исток» и «сток» каждой ветви;

– «исток» и «сток» любой ветви являются так называемыми точками поворота, положения которых определяются предысторией перемагничивания материала сердечника и находятся в соответствии с правилами Моделунга;

– «исток» первой ветви расположен в начале координат (или в любой точке на основной кривой намагничивания), ветвь совпадает с начальной (основной) кривой, а ее предполагаемый «сток» – в точке на основной кривой с координатами ( $BMS$ ,  $HMS$ ) или ( $-BMS$ ,  $-HMS$ ) в зависимости от направления намагничивания.

Последнее положение создает определенность в задании начальных условий.

Перейдем теперь к изложению методики использования разработанной программы.

Полагаем, что любой инженер-разработчик может продумывать режимы работы сердечников каждого электромагнитного элемента в устройстве, которое проектируется (например, ИВЭП с ИПН), начиная с первого включения и, кончая установившимся квазипериодическим режимом, и нарисовать первое приближение предполагаемой последовательности перемещения рабочей точки на плоскости характеристик намагничивания  $B-H$ . Затем легко составить последовательность значений индукции в точках поворота.

Для адекватного моделирования процессов и качественной прорисовки траекторий перемещения рабочей точки следует воспользоваться программой для ПЭВМ «Гистерезис» (государственная регистрация № 2013612333).

Программа «Гистерезис» осуществляет управление процессом моделирования перемагничивания ферромагнетиков по любым траекториям перемещения рабочей точки, отражающей на графиках интенсивность магнитного поля внутри сердечника. Каждый режим перемагничивания задается (при диалоге с ПЭВМ) последовательностью значений магнитной индукции в точках поворота направления намагничивания. Расчет значений индукции в промежуточных точках траекторий с заданным относительным шагом осуществляется основным модулем программы. Специальный раздел программы определяет абсциссу  $H$  каждой расчетной точки, реализует переход с одной ветви намагничивания на другую, определяет положение точки «стока», выбор аппроксимирующих выражений и расчет коэффициентов моделирующих выражений в соответствии с отмеченными выше закономерностями, иначе говоря, логикой перемагничивания.

После запуска исполняемого модуля программы «гистерезис.exe» на экране монитора появляется основная форма-заготовка программы, в левой части которой расположены «пустые» окна для внесения исходных данных (дата вносится автоматически). В правой части подготовлено место для графика процесса перемагничивания и массивов значений  $B$  и  $H$ .

На рис. 1 показан вид основной формы программы после ввода задания на моделирование. Материал сердечника выбран в меню, выпадавшем после нажатия на кнопку справа от окна. Значения индукции в точках поворота (дробная часть числа отделяется точкой) вводились в окно над кнопкой «Добавить», а затем после нажатия на эту кнопку переносились в формируемый массив, в окно справа.

Нажатие кнопки «Старт» включает программу «гистерезис», и реализуется процесс моделирования перемагничивания. На рис. 2 воспроизведен вид основной формы программы после завершения моделирования процесса перемагничивания сердечника из феррита марки 2500НМС1. Следует заметить, что масштабы по осям графика подбираются автоматически для полного использования запланированного места. В двух колонках слева от графиков выведены массивы значений индукции и напряженности

во всех точках поворота и промежуточных расчетных точках. Массивы можно просмотреть, сдвигая цифры синхронно (при наличии отметки в окне снизу) или раздельно в каждом массиве. Результаты моделирования (графики и массивы) сохраняются в архивном файле. Нетрудно проследить, что все закономерности перемагничивания, отмеченные выше, четко выполняются.

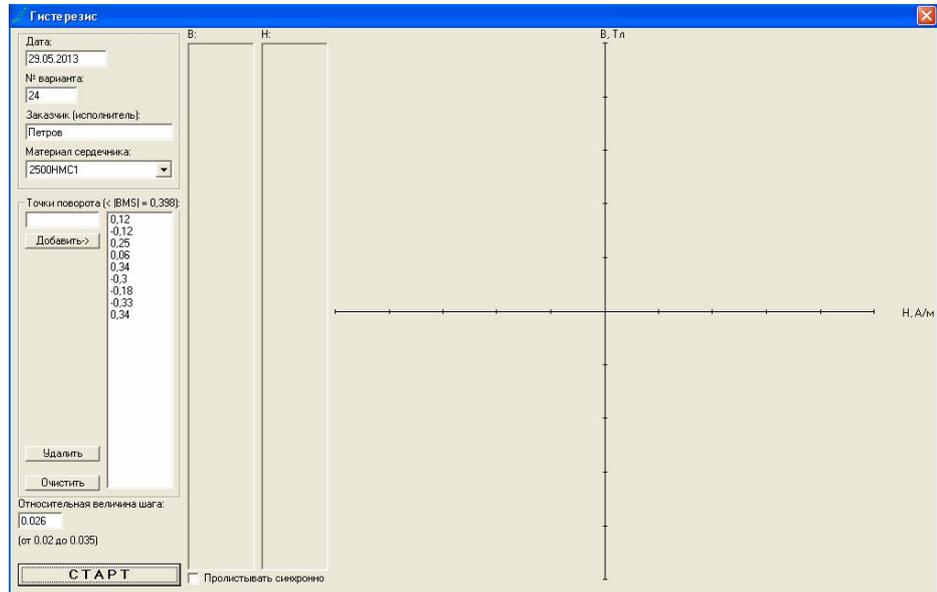


Рис. 1. Основная форма программы с исходными данными

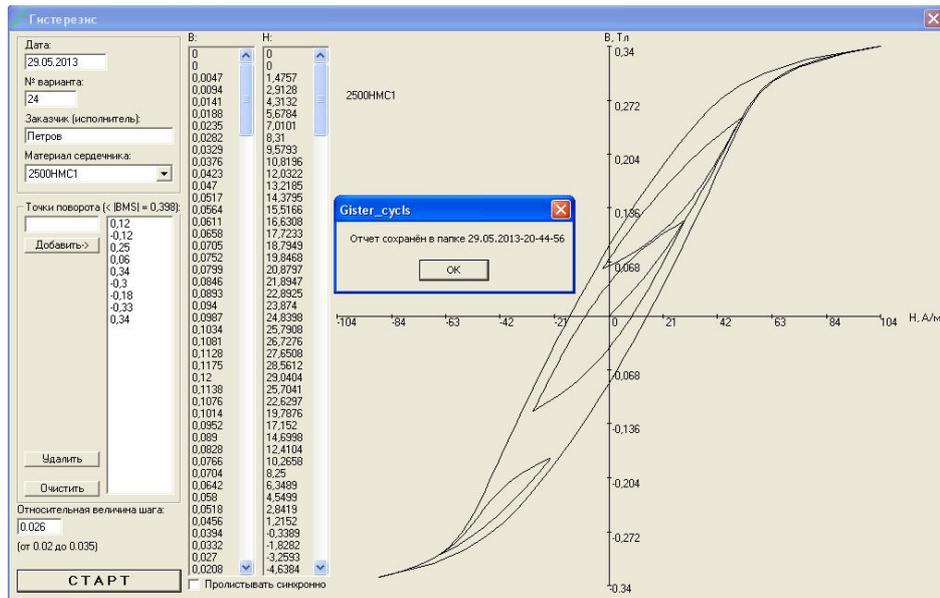


Рис. 2. Вид основной формы программы после нажатия кнопки «Старт» и завершения моделирования процесса перемагничивания сердечника из феррита марки 2500НМС1

Может оказаться, что результаты первых опытов по моделированию процессов перемагничивания разочаруют инженера-разработчика из-за расхождения его собственных представлений о ходе процесса и результатов работы программы «Гистерезис».

зис». Однако это объясняется только пробелами в образовании, так как сведения, приводимые в учебной литературе, не достаточны для формирования четких представлений о процессах, особенно, если перемагничивание проходит по несимметричным частным циклам. Рекомендуем поэкспериментировать с программой, задавая сначала малые массивы точек поворота и постепенно усложняя задания. В результате появится доверие к программе.

В заключение следует отметить, что программа «Гистерезис» может использоваться в учебном процессе в виде виртуальной лабораторной работы. В этом случае не вызовет проблем обеспечение достаточного количества индивидуальных заданий.

#### Список литературы:

- [1] Александров В.В. Математическое моделирование на ЭВМ процессов перемагничивания индуктивных элементов импульсных преобразователей напряжения. [Текст]/ В.В. Александров, О.К. Морозов, В.И. Самулеев, М.Г. Тылес. – Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 2. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – с. 239–242.
- [2] Аркадьев В.К. Избранные труды [Текст]/ В.К. Аркадьев. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 331 с.

**Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин**

*НГТУ им. Р.Е. Алексеева*

**В.В. Гуляев**

*ФБОУ ВПО «ВГАВТ»*

### **РАСЧЕТ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ «ЗВЕЗДА–ЗВЕЗДА С НУЛЕВЫМ ПРОВОДОМ»**

Исследование несимметричных режимов позволяет определить допустимые диапазоны изменения нагрузки, параметры трансформаторно-тиристорного оборудования, дать рекомендации по оптимальному распределению нагрузки. Разрабатываемый ТТРН ОТ имеет схему соединения обмоток трансформатора  $Y/Y_n-0$  и практически всегда будет работать с теми или иными отклонениями от симметрии. Эти отклонения возрастают с ростом мощности однофазных потребителей и получаются особенно большими в аварийных несимметричных режимах. Несимметричная работа трансформаторов может быть связана как с несимметрией подведенного напряжения, так и с несимметрией нагрузки. Та и другая причины приводят к несимметрии вторичных напряжений трансформаторов, что сказывается на качестве электроснабжения потребителей. Для самого ТТРН ОТ несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузки отдельных обмоток, тиристорных ключей, а также чрезмерных повышений фазных напряжений и насыщения магнитопровода.

В инженерной практике анализ несимметричных режимов трехфазных трансформаторов, как правило, проводится на основе метода симметричных составляющих [1,2,3]. Основным достоинством данного подхода является возможность использования схем замещения приведенного трансформатора для токов различных последовательностей и проведение расчетов с помощью аналитических формул и компьютерного моделирования.