

**Труды Нижегородского государственного технического
университета**

Том 59

Актуальные проблемы энергетики

Юбилейный том, посвященный 100-летию со дня рождения

С.Н.Шевчука

Н.Новгород

НГТУ

2006

ЛОХОВ С.П., СИВКОВА А.П.

НИЖЕГОРОДСКАЯ МОДЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА И ЕЕ РАЗВИТИЕ

Южноуральский государственный университет

Давно известен прием моделирования вихревых токов в магнетиках линейным резистором, подключенным параллельно катушке на магнитопроводе уже без вихревых токов [1]. Это есть разделение (декомпозиция) одного процесса на два независимых. Поэтому еще аспирантом я в известную схему получения петли гистерезиса на экране осциллографа (рис. 1)

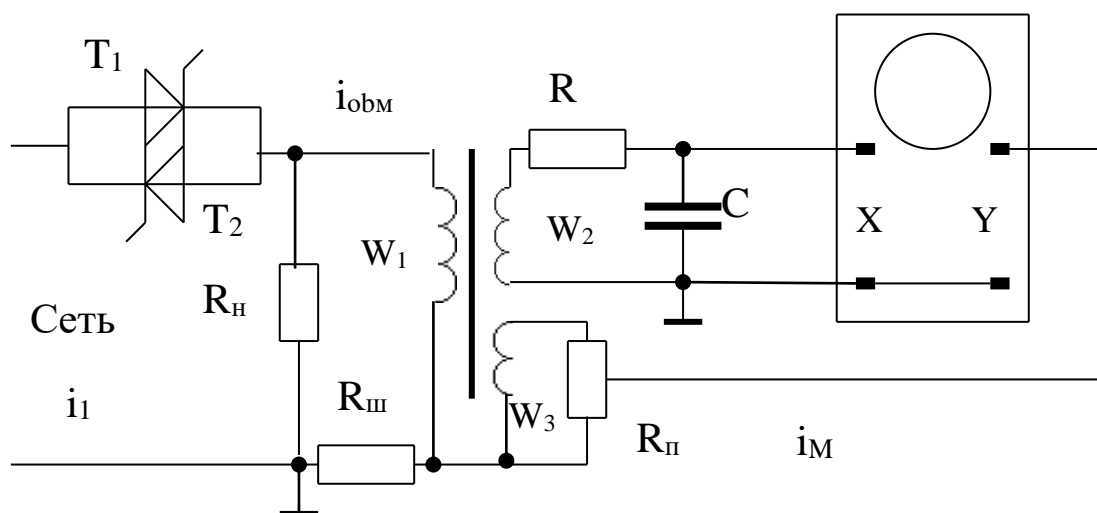


Рис.1. Схема получения на экране осциллографе петли гистерезиса без вихревых токов

добавил к измерительной обмотке W_2 еще одну W_3 , сигнал на которой пропорционален составляющей вихревых токов по [1], с подбираемым потенциометром R_{Π} коэффициентом, и вычел его из сигнала с $R_{\text{ш}}$ полного тока обмотки $i_{\text{обм}}$ трансформатора без нагрузки $R_{\text{н}}$. Этот коэффициент в конечном итоге определит соотношение потерь на вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе. Определяют его достаточно сложно. Строят кривую зависимости общих потерь в магнитопроводе от частоты синусоидального напряжения питания, находят для нее сплайн второго порядка, коэффициент перед квадратичным членом и будет искомым. В схеме на рис.1 это делается очень просто при ее питании несинусоидальным

напряжением со скачком (рис.2), который, как известно, разлагается в ряд Фурье с бесконечным спектром частот. В чистом токе намагничивания не

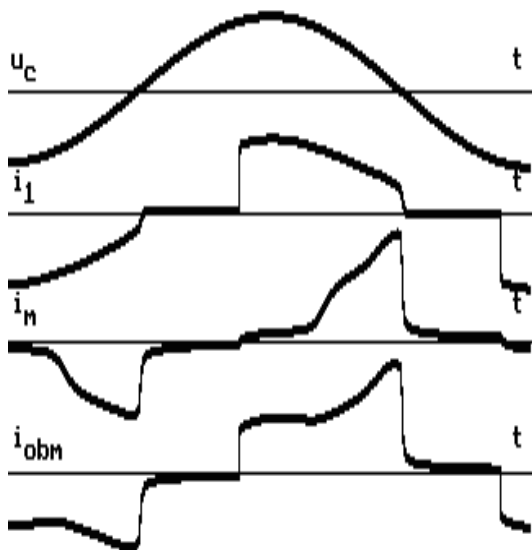


Рис.2. Осциллограммы к рис. 1

наблюдения глазом при изменении частоты синусоидального питания 20–400 Гц, что не удивительно потому, что она отстроена от скачка с бесконечным частотным диапазоном. Все это мне казалось настолько очевидным [1], что я сохранил написанное только в Приложении к диссертации [2], в которой статический гистерезис описывал гиперболами из неудобной модели М.А.Панасенкова.

В 1974 году я получил автореферат докторской диссертации Ю.А.Савиновского с другой моделью статического магнитного гистерезиса, который в дальнейшем называю Нижегородской (ННМГ). Диссертация не

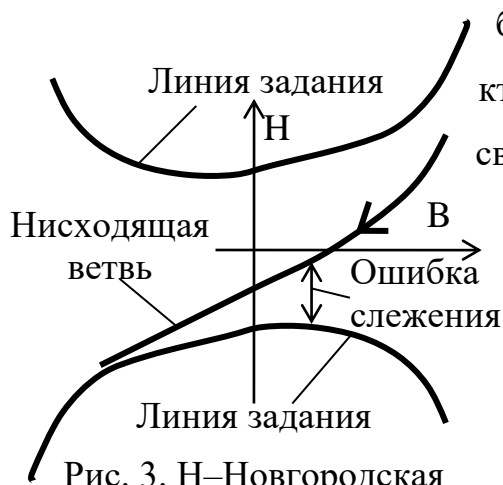


Рис. 3. Н–Новгородская модель гистерезиса

должно быть скачков, а в токе обмотки $i_{обм}$ мы его видим (рис.2). Поэтому потенциометр $R_{п}$ ставится в такое положение, когда скачок в сигнале $i_{м}$ на рис.2 исчезает. На экране осциллографа получилась статическая петля гистерезиса. Эксперименты с

трансформаторными стаями показали, что петля не менялась с точностью

наблюдения глазом при изменении

была поддержана ВАК, сейчас эту модель мало кто знает, поэтому излагаю идею этой модели своими словами автоматчика. Аргументом (входом) является индукция, функцией (выходом) напряженность. Это соответствует расположению осей на рис.3.

Представим себе систему автоматического регулирования (САР), которая должна отработать свое задание, показанное на рисунке «Линией задания». Для нисходящей ветви гистерезиса линия

задания показана снизу, для восходящей – сверху. При отработке нисходящей ветви мы движемся по индукции влево, при восходящей – вправо. САР обладает инерционностью, в общем случае она нелинейна. Эта следящая САР на каждом следующем шаге уменьшает «Ошибку слежения», оставляя за собой «линию погони» или ветвь петли гистерезиса. Исследователю надо выбрать удобную функцию для линии задания и инерционности. Простейшая инерционность – аperiodическое звено, при нем ошибка слежения затухает по экспоненте. И все...

На рис.3 выбран самый неординарный случай расходящихся линий задания, когда получаются экзотические петли с выбросами во 2-м и 4-м квадрантах. Я включил параллельно статической модели ННМГ сопротивление потерь на вихревые токи и долго не имел проблем с моделированием вентильных преобразователей (ВП) со сталями.

В 1986 году зарубежом была предложена и получила широкое распространение в пакетах для моделирования инверсная модель Джилса-Атертона [3] с той же идеей экспоненциального затухания ошибки слежения, но аргументом (входом) стала напряженность, а функцией – индукция. Траектории слежения при этом получаются другие, хотя похожие, но такая смена координат очень неудобна для программирования. Но главное, все авторы замучались с уточнениями своих моделей для динамических режимов с вихревыми токами в рамках одной модели. Как вы уже поняли, этого делать не надо, разные явления описываются разными моделями. Совсем недавно, я направлял все написанное здесь в центральную печать, но получил резко отрицательную рецензию крупного специалиста (физика) по магнитным материалам с советами, что мне следует читать работы физиков, а не Савиновского, Джилса–Атертона, заняться исследованиями магнетиков баллистическими приборами, получить точность не более 5%. Я же не знаю ни одной удобной для программирования физической модели, близкой по удобству даже к неприятной мне зарубежной модели [3]. Мне стало ясно, как диссертацию Савиновского физики не пропустили через ВАК. Редакция же

написала мне, что положения из [1] широко известны, а материал из [2] считается опубликованным. На вопрос, почему тогда не используют простую «опубликованную» схему рис.1 для выделения составляющей потерь на вихревые токи, я не получил ответа.

Недавно я получил из Нижнего Новгорода автореферат диссертации В.В.Гуляева, который использовал ННМГ. В переписке он напомнил мне, что свой вклад в ее развитие ННМГ внесли В.В.Александров, В.С.Нарсесян и другие ученые из Нижнего Новгорода. К большому сожалению, их публикации кратки и малодоступны, как и автореферат Ю.А.Савиновского.

С.П.Лохов.

Специалистов по ВП больше доверяют снятым физиками кривым перемагничивания из справочников, но их больше интересуют мгновенные значения траекторий ветвей гистерезиса, чем интегральные составляющие потерь. Поэтому приятнее иметь в памяти ЭВМ библиотеку кривых из справочников и на одном экране монитора наблюдать, как кривые модели накладываются на справочные. Такая оценка по всему ансамблю более важна инженеру, чем проверка одной интегральной характеристики магнетика. В справочниках нам предоставлены неподготовленные к вводу в ЭВМ графики. Сплаины – самый простой и компактный прием ввода в ЭВМ любых графиков. Кривые гистерезиса специфичны участками бесконечных производных и двузначностями, что не позволяет использовать полиномиальные сплайны. Лучше подходят для этого сплайны конических сечений с участками эллипсов и гипербол. Они решают как упомянутую проблему, так расширяют область существования сплайна до бесконечности, что избавляет нас от неприятных остановок программ при выходах за дозволенные границы. В бесконечность уходит гипербола, это единственная из простых кривая, имеющая асимптоты [4].

В результате модель ННМГ с сопротивлением вихревых потерь дала удовлетворительные совпадения с петлями из справочников на разных частотах. Но нам хотелось получить хорошее совпадение.

Была выдвинута гипотеза, что даже для тонких листов стали нельзя пренебрегать явлением вытеснения магнитного поля. Этими явлениями

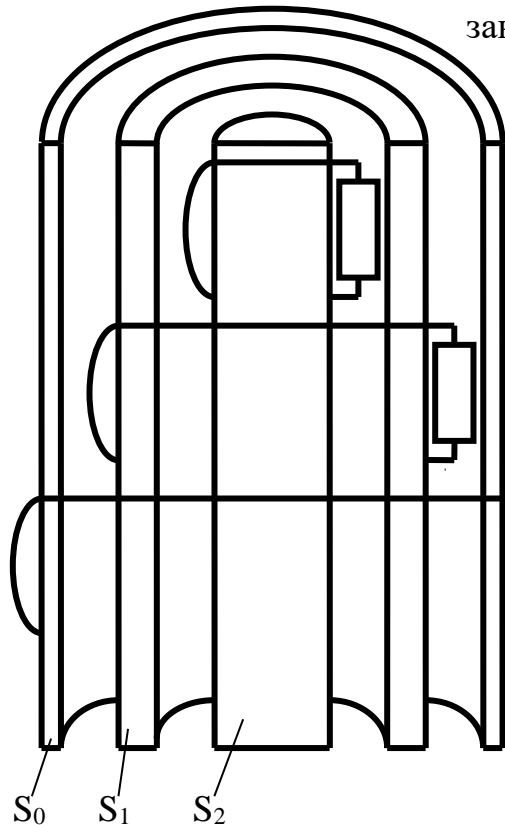


Рис.4 Многослойная модель магнитопровода

занимались наши ученые Л.Р.Нейман, А.В.Нетушил и др. Мы воспользовались результатами работы А.В.Нетушила, который показал, что магнитные и тепловые процессы описываются одинаковыми уравнениями в частных производных, а температура на поверхности нагреваемого тела поднимается как на выходе полуинерционного звена. Передаточная функция этого звена отличается от инерционного звена половинным (вместо единичного) наклоном его частотной характеристики.

Для нашего случая поверхность – это входные зажимы питания модели сердечника на рис.4. Полуинерционное звено получится, если сплошную сталь сердечника мы разобьем на слои переменной толщины со своими сопротивлениями потерь на вихревые токи. Собственно результат Нетушила не противоречит здравому смыслу, но вооружает нас идеей расчета толщины этих слоев. Для рис. 4 получается система легко решаемых на ЭВМ система дифуравнений, в которой производные всех координат получаются явными методами, в формуле следующей координаты используются результаты предыдущих расчетов. Более того, решение программируется в виде простого цикла, поэтому нет проблем программирования решения задачи при любом числе слоев. Аналитические формулы получить пока не удалось, да и нужны ли они? Эксперименты на ЭВМ теперь дали хорошие результаты совпадения со статическими и динамическими петлями гистерезиса американских сталей на

разных частотах. Выбраны были американские стали из-за сложности их петель гистерезиса. Именно эти стали подозреваются на экзотические обратные выбросы. Мы ожидаем, что с гладкими петлями гистерезиса наших сталей будет меньше проблем.

Выводы

Известный из курса ТОЭ прием моделирования вихревых токов активным сопротивлением параллельно идеальной (без рассеяния) обмотке на сердечнике позволяет использовать статическую модель гистерезиса при широком диапазоне частот и в переходных процессах.

Этот прием позволяет на простой установке с питанием напряжением со скачками (рис.1) выделить составляющую вихревых токов и увидеть статическую петлю гистерезиса. Установку можно использовать для технического контроля сталей, разделения составляющих потерь в них.

Даже в тонколистовой стали надо учитывать эффект вытеснения магнитного поля, но этот учет получается простым для программирования.

Нижегородская модель статического гистерезиса ННМГ (рис.3) пока является самой точной из простых моделей и самой простой из точных. Возможности ее развития далеко не исчерпаны.

Литература

1. Теоретические основы электротехники/ Г.И.Атабеков, С.Д.Купалян, А.Б.Тимофеев и др. Часть II-III. – М.–Л.: Энергия, 1966.
2. Лохов С.П. Разработка и исследование тиристорных регуляторов мощности нагревательных установок. Дисс. к.т.н. – Челябинск: ЧПИ, 1972.
3. Новиков А.А., Амелин С.А. Экспериментальное исследование параметров модели перемагничивания ферромагнетиков Джилса–Атертона. – Электричество, 1995, N 9. – С. 46–51.
4. Лохов С.П., Сивкова А.П. Сплайны конических сечений и петля гистерезиса // Труды XI Международной конференции «Электромеханика, электротехнология и электроматериаловедение. МКЭЭЭ-2006», часть 2. – Крым, Алушта. – С. 295, 296.