

ГИСТЕРЕЗИСНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И УПРАВЛЯЕМЫХ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

Аннотация

Некоторые электромагнитные процессы (регулирование мощности управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов, феррорезонансное повышение напряжения на трансформаторах напряжения и др.) в таких устройствах, как трансформаторы (силовые и измерительные) и особенно управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШР с подмагничиванием), обусловлены нелинейной характеристикой намагничивания магнитопровода. Для качественного анализа искажающего воздействия процессов в таких устройствах на синусоидальную форму напряжения в сети, к которой они подключены, необходимо учитывать гистерезисный эффект их магнитных систем. В статье приведено описание гистерезисной модели нелинейного магнитного сопротивления, предназначенной для моделирования электромагнитных процессов в трансформаторах и УШР с подмагничиванием.



М.И. ФУРСАНОВ,
д.т.н., профессор, заведующий
кафедрой «Электрические
системы» БНТУ

Annotation

Some electromagnetic processes are caused by the nonlinear magnetization characteristic of the magnetic circuit. For example, such processes occur in devices such as transformers (power and measuring) and, especially, magnetically controlled shunt reactors. The designated processes include: the process of power regulating of the magnetically controlled shunt reactors, the process of ferroresonance voltage increase in voltage transformers, etc. For a qualitative analysis of the distorting effects of processes in such devices on the sinusoidal form of connecting network voltage, it is necessary to take into account the hysteresis effect of their magnetic systems. This article describes the hysteresis model of nonlinear magnetic resistance, designed to simulate electromagnetic processes in transformers and magnetically controlled shunt reactors.



И.И. ДУЛЬ,
м.т.н., ведущий инженер отдела
проектирования энергосистем РУП
«Белэнергосетьпроект»

Статья поступила в редакцию 20 мая 2019 года

Гистерезисная модель применима для любых электроустановок с магнитопроводом, таких как силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы и управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы (УШР с подмагничиванием). Однако наибольшую актуальность разработанная модель имеет для моделирования процессов в УШР.

УШР с подмагничиванием представляет собой электромагнитную систему, магнитопровод которой с целью плавного регулирования потребляемой из сети реактивной мощности подмагничивается постоянным током. В настоящий момент в сетях 330 кВ Белорусской энергосистемы установлено пять таких устройств номинальной мощностью 180 МВА каждое.

Регулирование реактивной мощности УШР с подмагничиванием осуществляется благодаря нелинейной характеристике намагничивания магнитопровода [1]. В описанных шунтирующих реакторах номинальным напряжением 330 кВ и номинальной мощностью 180 МВА потери мощности достигают 1 МВт, причем значительную их часть составляют потери в магнитопроводе, обусловленные гистерезисными явлениями. В то же время нелинейные гистерезисные явления в магнитопроводе УШР являются одной из причин искажающего воздействия данных устройств на синусоидальную форму напряжения в точках подключения к энергосистеме [1].

Для качественного моделирования переходных процессов в УШР с подмагничиванием в РУП «Белэнергосетьпроект» разрабатывается гистерезисная модель магнитопровода. Ее ключевым элементом является модель нелинейного магнитного сопротивления, рассмотренная в данной статье.

Разрабатываемая модель магнитного сопротивления также применима для качественного расчета явлений феррорезо-

нансного повышения напряжения на трансформаторах напряжения. Явления феррорезонансного повышения напряжения в настоящее время традиционно моделируются без учета гистерезиса [2].

Реализация модели магнитного сопротивления в MATLAB

Блок-схема разработанной модели нелинейного магнитного сопротивления приведена на рисунке 1. Ключевыми элементами схемы являются блок измерения напряженности магнитного поля (блок 1), расчетная функция в виде программного кода (блок 2) и управляемый источник магнитного потока (блок 3).

Модель нелинейного сопротивления функционирует следующим образом. Блок 1 измеряет значение напряженности магнитного поля и передает его блоку 2, который обрабатывает полученное значение и формирует значение магнитной индукции, передаваемое блоку 3. Блок 2 содержит программный код, реализующий гистерезисный нелинейный эффект рассматриваемой модели. Блок 3 задает магнитный поток через моделируемое нелинейное сопротивление.

Модель нелинейного сопротивления реализует функции вида

$$\begin{aligned} B &= f(H), \\ F &= B \cdot S, \end{aligned} \quad (1)$$

где B – магнитная индукция, Тл; H – напряженность магнитного поля, А/м; F – магнитный поток, Вб; S – площадь поперечного сечения магнитопровода, м².

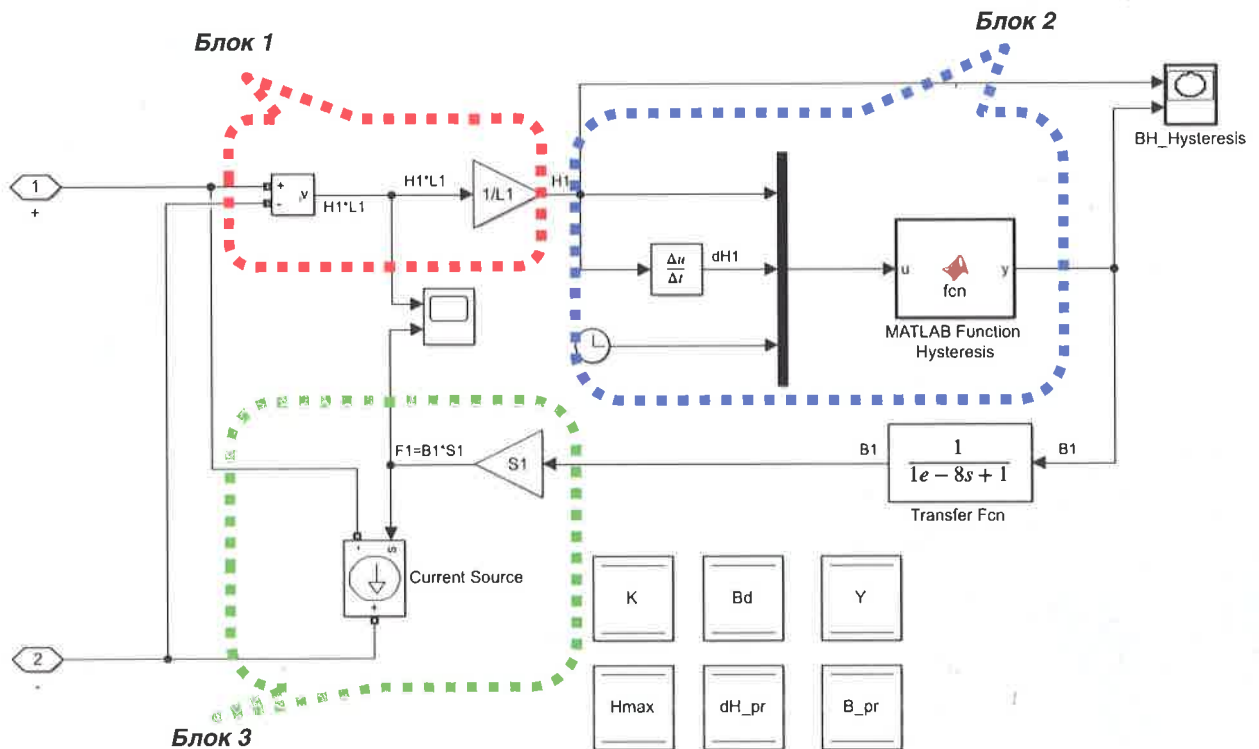


Рис. 1. Модель нелинейного магнитного сопротивления

Расчетная функция блок-схемы магнитного сопротивления (блок 2)

Математическая модель расчетной функции принята по данным, приведенным в статье [3]. В этом источнике описана наиболее совершенная математическая модель магнитного гистерезиса, которая применяется в компьютерной программе LTspice, предназначенной для моделирования переходных процессов в аналоговой микроэлектронике. С учетом возросших требований к точности моделирования переходных процессов в энергетике данная модель реализована авторами в программе MATLAB Simulink, применяемой для расчетов процессов в энергетических устройствах.

Рассматриваемая математическая модель магнитного гистерезиса описывается следующими основными формулами [3]:

$$\begin{aligned}
 B_{up}(H) &= B_s \cdot \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \cdot \left(\frac{B_s}{B_r} - 1\right)} + \mu_0 \cdot H, \\
 B_{dn}(H) &= B_s \cdot \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c \cdot \left(\frac{B_s}{B_r} - 1\right)} + \mu_0 \cdot H, \\
 B_{md}(H) &= B_s \cdot \frac{B_{up} + B_{dn}}{2},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где B_{up} – магнитная индукция при формировании восходящего участка предельной петли гистерезиса, Тл; B_{dn} – магнитная индукция при формировании нисходящего участка предельной петли гистерезиса, Тл; B_{md} – магнитная индукция при формировании среднего участка петли гистерезиса, Тл; H_c – коэрцитивная сила, А/м; B_s – индукция насыщения, Тл; B_r – остаточная индукция, Тл.

Одним из преимуществ описанной математической модели является возможность ее настройки по достаточно распространенным параметрам стали, таким как индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c [4].

На рисунке 2 приведена расчетная осциллограмма напряженности магнитного поля (H) и магнитной индукции (B) для тестового переходного процесса в магнитном сопротивлении. Перед переходным процессом магнитное сопротивление не имеет остаточной индуктивности. Переходный процесс заключается в постепенном увеличении амплитуды H на протяжении от 0 до 0,2 с. На расчетных осциллограммах демон-

стрируется процесс увеличения амплитуды B в магнитном сопротивлении.

По данным, полученным в тестовом переходном процессе (рис. 2), построены петли гистерезиса (рис. 3). Как можно убедиться, в ходе тестового переходного процесса магнитная индукция непрерывно изменяется от нулевых значений до индукции насыщения, постепенно переходя от одного частного цикла петли гистерезиса к другому и достигая предельной петли гистерезиса.

Отдельного внимания заслуживает второй тестовый расчетный случай (рис. 4). В начале переходного процесса остаточная индуктивность магнитного сопротивления равна нулю. Переходный процесс изменения напряженности магнитного поля (H) и магнитной индукции (B) начинается на участке петли гистерезиса обозначенном как 1. Затем проходит по участку 2 и, достигая точки 3, ввиду смены направления изменения H проходит по участку 4. После этого переходный процесс повторяется по участкам 2-5-6.

Приведенный случай (рис. 4) имеет особое значение для корректного моделирования электромагнитных переходных процессов с несинусоидальной формой токов и напряжений, например процессов включения и отключения выключателей [5, 6], процессов, возникающих при работе выпрямительных и инверторных установок [7] и др.

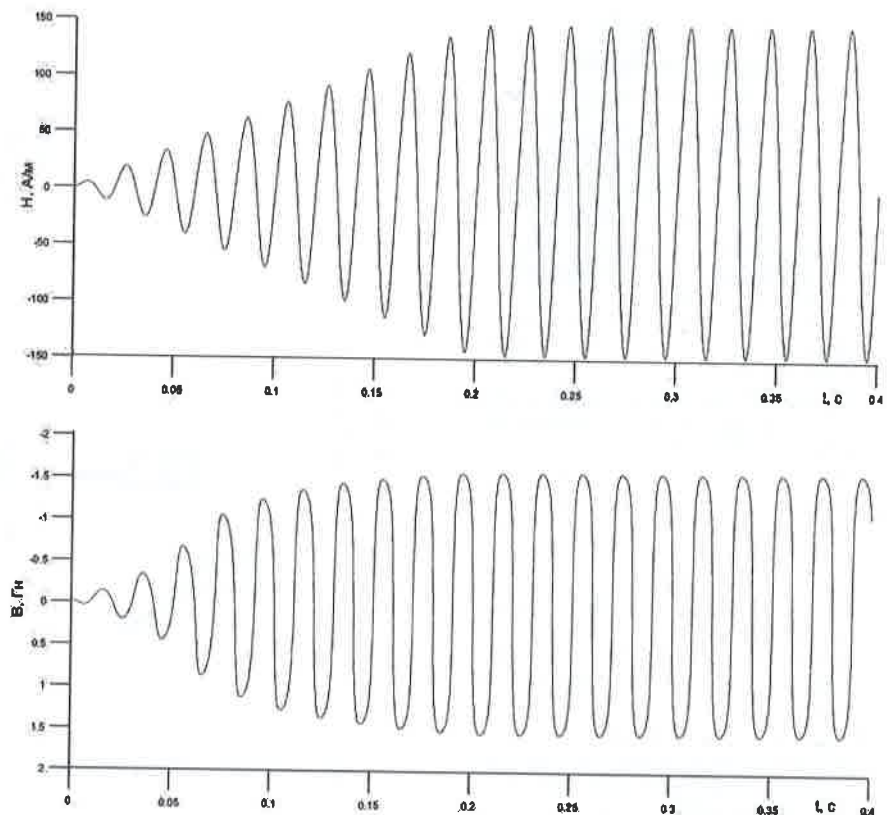


Рис. 2. Расчетная осциллограмма напряженности магнитного поля (H) и магнитной индукции (B) для переходного процесса в магнитном сопротивлении

Выводы

1. Моделирование гистерезисных нелинейных характеристик намагничивания магнитопровода в настоящее время все более востребовано при выполнении расчетов электромагнитных переходных процессов в энергетике. Например, гистерезис необходимо учитывать при моделировании переходных процессов в управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах, а также при анализе явлений феррорезонансных повышений напряжения на трансформаторах напряжения.

2. С учетом возросших требований к корректному моделированию переходных процессов в энергетике авторами реализована наиболее совершенная гистерезисная модель нелинейного магнитного сопротивления в программе MATLAB Simulink, применяемой для расчетов в энергетике.

3. В статье приведены результаты расчетов для тестовых случаев, которые демонстрируют корректность моделирования гистерезисных эффектов в электромагнитных переходных процессах.

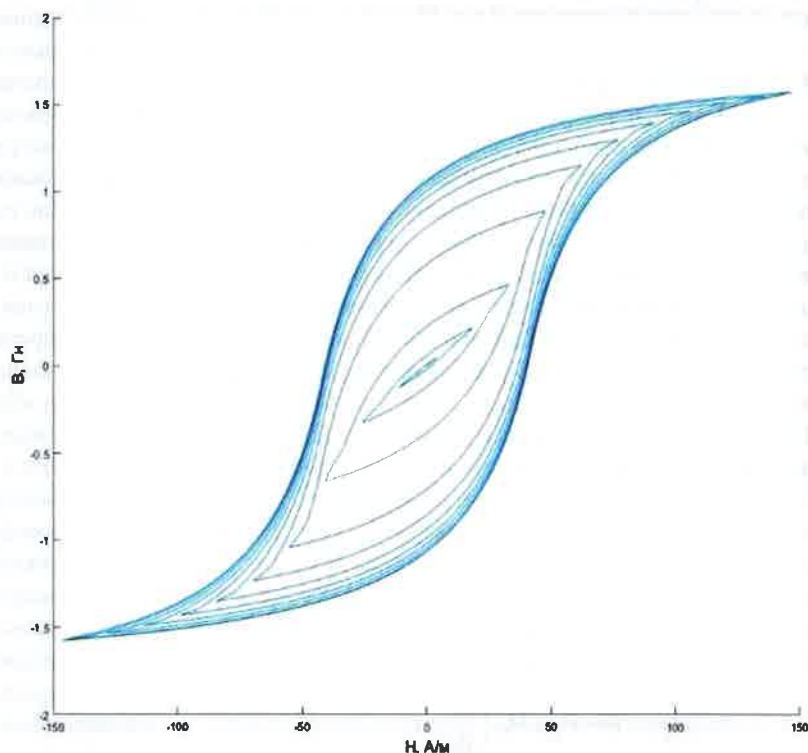


Рис. 3. Петли гистерезиса, формируемые в переходном процессе

Список литературы

1. Дмитриев, М.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин, А.Г. Долгополов, Д.В. Кондратенко; под ред. Г.А. Евдокунина. – СПб.: Родная Ладога, 2013. – 280 с.
2. Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6–750 кВ: СТО 56947007-29.240.10.191-2014. – Введ. 19.11.14. – Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС».
3. Володин, В. Гистерезисная модель нелинейной индуктивности симулятора LTspice / В. Володин // Силовая электроника. – 2010. – № 1. – С. 56–60.
4. Дружинин, В.В. Магнитные свойства электротехнической стали / В.В. Дружинин. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
5. Электрооборудование электрических станций и подстанций: учеб. пособие / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – Изд. 4-е. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 448 с.
6. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 519 с.
7. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие / Л.А. Бессонов. – М.: Юрайт, 2016. – 701 с.

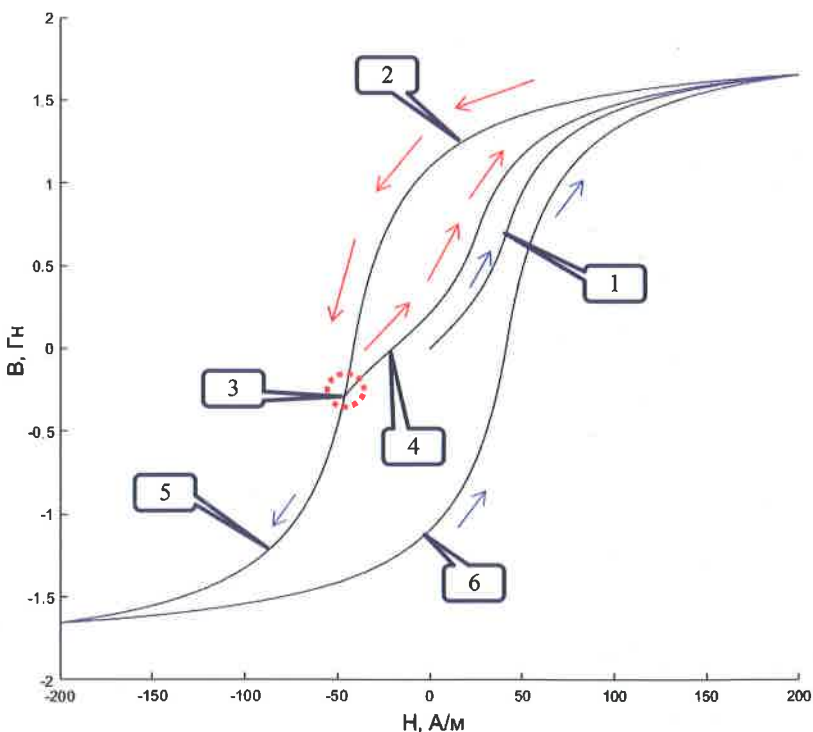


Рис. 4. Модель нелинейного магнитного сопротивления