

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ СИМПОЗИУМ «УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ»

21-28 апреля 2009 г.

ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.89

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА БАЗЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ДЕГТЯРЁВ Е. А., КАРЯКИН А. Л.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Прогнозирование режимов электропотребления (электрической нагрузки) необходимо для решения практически всего спектра задач текущего планирования и оперативного управления электроэнергетическими системами (ЭЭС) промышленных предприятий.

У потребителя, приобретающего электроэнергию на оптовом и (или) розничном рынке, появляется задача составления достоверной заявки на потребление электроэнергии на некоторый срок вперед. Это связано с тем, что излишнее или недостаточное потребление электроэнергии, заказывающейся по предварительным заявкам предприятия-потребителя, приводит к незапланированным издержкам поставщика в точке генерации [3]. Поэтому увеличение точности прогноза даже на десятые доли процента может привести существенному снижению затрат на оплату отклонений от плана по поставкам электроэнергии [1].

В настоящее время для решения задач прогнозирования применяется метод искусственных нейронных сетей (ИНС), рассмотренный в работе [3], и относительно новый метод, являющийся гибридом нечеткой логики и нейронных сетей, который включил в себя основные свойства, присущие этим направлениям. Предпочтение их традиционным моделям (регрессионные модели и модели на основе временных рядов) обусловлено тем, что не требуется построение модели объекта, не теряется работоспособность при неполной входной информации. Они обладают устойчивостью к помехам и имеют высокое быстродействие. [2]

Нейронные сети – это устройства параллельной обработки. Они обладают способностью к обучению и обобщению накопленных знаний. Обученная на ограниченном множестве данных сеть способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты на данных, не использовавшихся в процессе обучения. Нейронные сети обладают недостатками. Многие из недостатков могут быть устранены с помощью систем с нечеткой логикой, которые используют основные понятия теории нечетких множеств.

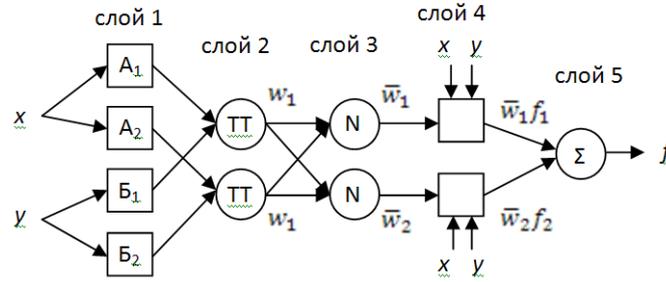
Нечеткая логика выделяется из теории нечетких множеств и представляет собой разновидность непрерывной логики, в которой логические переменные могут принимать истинностные значения между 1 и 0. Следует отметить, что результат, полученный в системах с нечеткой логикой, также представляется неточно, нечетко. Для того чтобы получить какое-либо конкретное значение, которое может быть использовано, применяют системы нечеткого вывода. Процесс нечеткого вывода представляет собой некоторую процедуру или алгоритм получения нечетких заключений на основе нечетких предпосылок или условий [4].

Рассмотрим класс адаптивных сетей, функционально эквивалентных системам нечетких рассуждений. Подобная архитектура носит название *ANFIS* (от англ., *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* – адаптивная нейро-нечеткая система заключений). Для нечеткой системы, имеющей два

входа x и один выход y , ANFIS архитектура показана на рисунке. База знаний такой системы содержит два нечетких правила ЕСЛИ-ТО типа Такаги-Сугено:

Правило 1: Если $x=A_1$ и $y=B_1$, то $f_1=p_1x+q_1y+r_1$.

Правило 2: Если $x=A_2$ и $y=B_2$, то $f_2=p_2x+q_2y+r_2$.



ANFIS-структура

Рассмотрим состав слоев (см. рисунок). Каждый узел первого слоя является адаптивным узлом со следующей узловой функцией:

$$Q_i^1 = \mu_{A_i}(x), \quad (1)$$

где x – входной сигнал узла i ; A_i – лингвистическая переменная, связанная с данной узловой функцией. Другими словами, Q_i^1 – функция принадлежности переменной A_i , определяющей степень, с которой данный x удовлетворяет A_i .

Каждый узел второго слоя является фиксированным узлом, перемножающим входные сигналы, причем выходное значение узла представляет собой вес некоторого правила:

$$\omega_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(x), \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Каждый i -й узел третьего слоя определяет отношение веса i -го правила к сумме весов всех правил:

$$\bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Выходные сигналы третьего слоя называются нормализованными весами.

Узлы четвертого слоя определяются линейными (для модели типа Сугено) функциями принадлежности выходных переменных:

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i f_i = \bar{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad (4)$$

где $\bar{\omega}_i$ – выходной сигнал третьего слоя и $\{p_i, q_i, r_i\}$ – набор параметров данного слоя (так называемые параметры вывода).

Единственный узел пятого слоя является фиксированным узлом, в котором вычисляется полное выходное значение адаптивной сети как сумма всех входных сигналов:

$$O_i^5 = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i}. \quad (5)$$

Очевидно, что для заданных значений параметров предпосылок полное выходное значение (см. рисунок) является линейной комбинацией параметров вывода:

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2} f_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} f_2 = \bar{\omega}_1 f_1 + \bar{\omega}_2 f_2 = \\ &= (\bar{\omega}_1 x) p_1 + (\bar{\omega}_1 y) q_1 + (\bar{\omega}_1) r_1 + (\bar{\omega}_2 x) p_2 + (\bar{\omega}_2 y) q_2 + (\bar{\omega}_2) r_2, \end{aligned} \quad (6)$$

где $p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2$ – параметры вывода.

В качестве объекта исследования взят цех агломерации фабрики окускования на ОАО КГОК «Ванадий». Для сравнения показателей точности прогнозирования моделей, основанных на нейросетевой и гибридной структуре, были:

- анализ технологического процесса переработки руды, технологических и энергетических показателей;
- исследование и отбор факторов (предикторов), влияющих на электропотребление;
- обработка исходных данных и удаление выбросов;
- разработка систем прогнозирования электропотребления цеха агломерации с помощью нейро-сетевого и гибридного метода в системе *Matlab*, пакет *Fuzzy Logic Toolbox*;
- оценка точности систем прогнозирования.

Исходное множество содержит 15 переменных: производство агломерата за текущую смену, время работы агломашин (2 шт.), текущий номер смены, среднесуточная температура воздуха, потребление электроэнергии (10 шт.). Далее массив исходных данных разбит на обучающее (3926 изм.), тестовое (184 изм.) и контрольное (185 изм.) множества.

В результате многократных экспериментов была получена нейронная сеть, наилучшим образом аппроксимирующая зависимость потребления электрической энергии от рассматриваемых факторов. Первый скрытый слой этой сети содержит 12 нейронов с логистическими функциями активации, второй скрытый слой – 10 нейронов с логистическими функциями активации, единственный нейрон выходного слоя имеет линейную функцию активации. Параметры гибридной сети взяты по умолчанию.

Результаты оценки моделей

Наименование показателя	Значение ИНС	Значение <i>ANFIS</i>
Количество циклов обучения (эпох)	26	13
Среднее квадратическое отклонение на обучающем множестве, кВт·ч	5556,4	6583,1
Среднее квадратическое отклонение на контрольном множестве, кВт·ч	5005,3	9014,4
Среднее квадратическое отклонение на тестовом множестве, кВт·ч	6471,3	7135,4
Относительная ошибка прогноза на обучающем множестве, %	3,40	4,03
Относительная ошибка прогноза на контрольном множестве, %	2,97	3,82
Относительная ошибка прогноза на тестовом множестве, %	3,75	3,91

Сравнивая результаты прогнозирования (см. таблицу), можно сделать следующее заключение. Ошибки прогнозов двух моделей весьма близки, хотя модель на основе ИНС незначительно превосходит по точности гибридную сеть. Это можно объяснить использованием стандартных параметров при обучении нейро-нечеткой сети, в частности, при использовании метода вычитающей кластеризации (*Subtractive clustering*). Дальнейшая отработка алгоритма выявления центров кластеров должна значительно повысить точность прогнозирования. Кроме того, почти вдвое меньшее количество циклов обучения, большая стабильность вычислений и довольно гибкая настройка правил с использованием нечеткой логики системы *ANFIS* убеждают в необходимости дальнейшего усовершенствования и использования данного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макоклюев, Б. И. Анализ и планирование электропотребления / Б. И. Макоклюев. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 295 с.
2. Шумилова, Г. П. Прогнозирование нагрузки ЭЭС на базе новых информационных технологий. Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами / Г. П. Шумилова, Н. Э. Готман, Т. Б. Старцева. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – С. 127-156.
3. Карякин, А. Л. Прогнозирование потребления электроэнергии цехом агломерации на основе метода искусственных нейронных сетей / А. Л. Карякин, К. Д. Белов, Е. А. Дегтярёв // Изв. вузов. Горный журнал. – 2008. – № 8. – С. 128, 129.
4. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия - Телеком, 2002. – 382 с: ил.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С СЕТЬЮ

ОСИПОВ П. А., КАРЯКИН А. Л.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Высоковольтный многоуровневый преобразователь частоты рассматривается в качестве системы, состоящей из взаимодействующих элементов. Исследование системы направлено на выявление элементов, оказывающих влияние на питающую сеть. Выявление элементов и характера их влияния на сеть определит способы компенсации воздействия высоковольтного многоуровневого преобразователя на сеть.

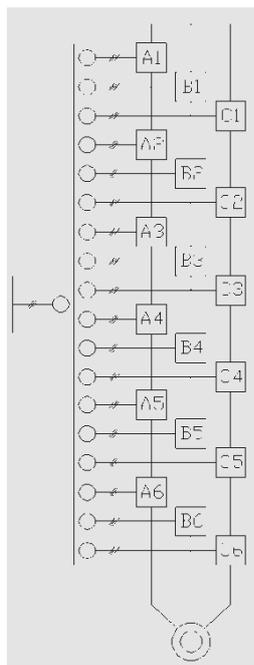


Рис. 1. Структурная схема высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты

Многоуровневый преобразователь частоты состоит из 18 изолированных элементарных инверторных ячеек и входного многообмоточного трансформатора (рис. 1). Входной многообмоточный трансформатор предназначен для питания элементарных инверторных ячеек и обеспечения гальванической развязки цепей. Элементарная инверторная ячейка представляет собой независимый источник переменного управляемого напряжения, работающий в режиме ШИМ. Ячейка состоит из трехфазного мостового управляемого выпрямителя и мостового инвертора напряжения (рис. 2).

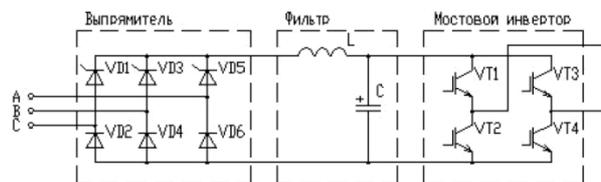


Рис. 2. Инверторная ячейка

Мостовой выпрямитель инверторной ячейки потребляет несинусоидальный ток вследствие коммутации вентилей, протекающий по вторичным обмоткам входного многообмоточного трансформатора (рис. 3). Мостовые выпрямители инверторных ячеек работают синфазно. Вторичные обмотки входного многообмоточного трансформатора создают несинусоидальный магнитный поток, сцепленный с витками первичной обмоткой. Следовательно, в первичной обмотке входного трансформатора искажается форма кривой тока, и трансформатор работает с пульсациями магнитного потока.

Компенсация искажений тока сети производится посредством алгоритма фазовой модуляции входных токов инверторных ячеек*. Конструктивная реализация алгоритма фазовой модуляции предполагает соединение вторичных обмоток входного многообмоточного трансформатора в трёхфазный зигзаг. Соотношение витков обмоток трёхфазного зигзага ω'/ω'' определяет сдвиг фаз выходного тока относительно тока сети.

Рассчитаны сдвиги фаз входных токов ячеек группы относительно базисной характеристики при промышленной частоте сети 50 Гц, числе ячеек многоуровневого преобразователя частоты, равном 18, числе фаз выходного напряжения преобразователя, равном 3, и длительности бестоковой паузы в 60° . Сдвиги фаз составляют: $-5^\circ, -15^\circ, -25^\circ, +5^\circ, +15^\circ, +25^\circ$ (рис. 4).

* Осипов, П. А. Расчёт сдвигов фаз входных токов инверторных ячеек высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты / П. А. Осипов, П. А. Зайцев // Материалы Уральской горнопромышленной декады, г. Екатеринбург, 14 - 23 апреля 2008 г. / Оргкомитет: Валиев (отв. за выпуск) и др.; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. – С. 230-232.

Кривая суммарного фазного тока обмоток низшего напряжения входного трансформатора имеет синусоидальную форму, т. е. входной трансформатор работает в нормальном режиме работы с симметричной нагрузкой фаз и синусоидальным магнитным потоком (рис. 5).

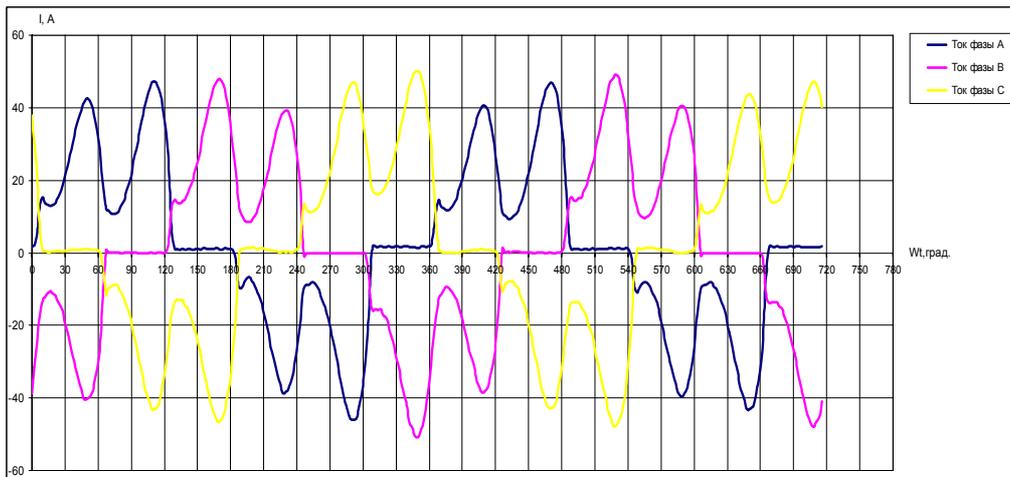


Рис. 3. Диаграмма входных токов инверторной ячейки

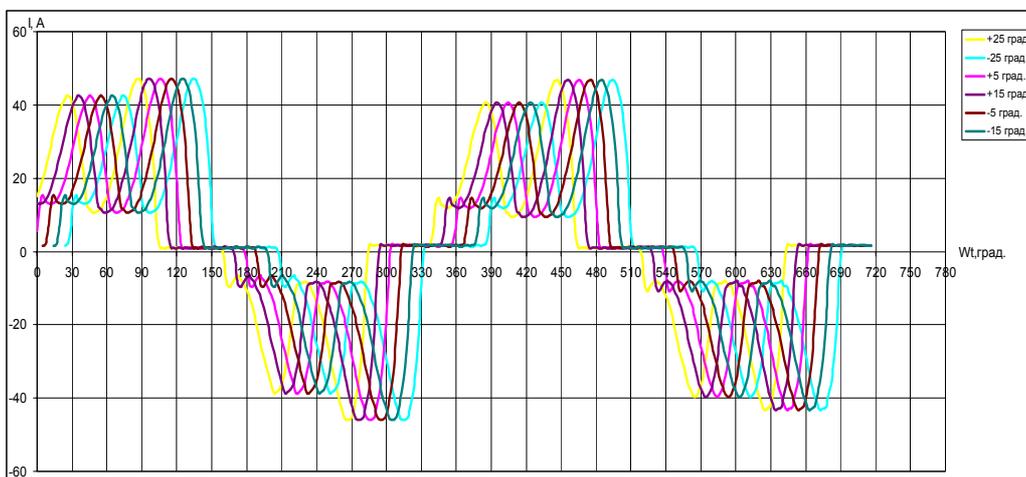


Рис. 4. Диаграмма модулированных входных токов инверторных ячеек фазы А выходного напряжения

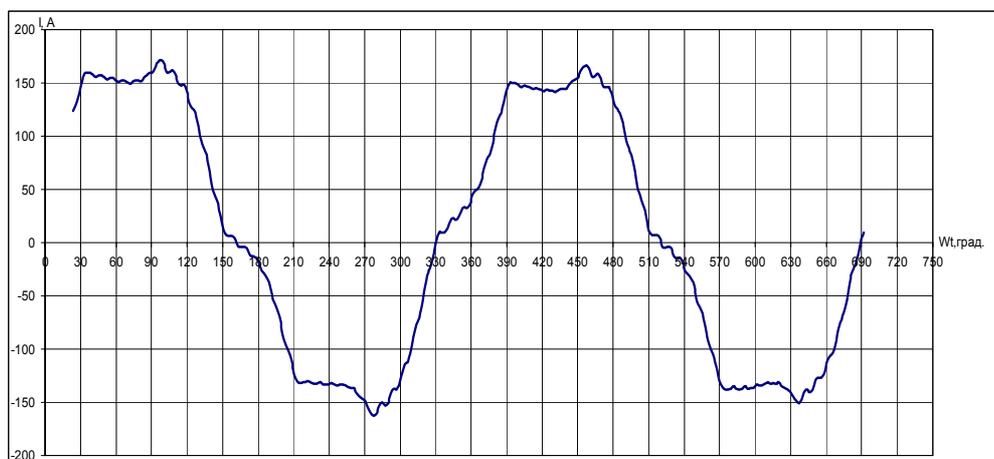


Рис. 5. Суммарный ток обмоток низшего напряжения фазы А входного трансформатора

В результате исследования системы выявлена нелинейность входных характеристик мостовых выпрямителей инверторных ячеек. Предложен алгоритм фазовой модуляции, обеспечивающий компенсацию искажений тока сети, устранение пульсаций магнитного потока в магнитопроводе трансформатора и увеличение энергосберегающего эффекта использования многоуровневого преобразователя частоты.

УДК 621.313

РАСЧЕТНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

МАКАРИЧЕВ К. В., КИРИЛЛОВ Р. С.

ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»

Энергосберегающие технологии, используемые в промышленности, представляют собой достаточно обширный перечень мероприятий, нацеленных на повышение энергоэффективности производства. Однако все эти мероприятия в конечном итоге преследуют одну цель – снижение производственных издержек на единицу продукции. Или, иными словами, нацелены на повышение коэффициента полезного действия производства.

Однако какими бы ни были мероприятия по повышению энергоэффективности, их основой является та часть энергии, которая теряется в процессе производства. Или, иными словами, это потери энергии. Поиск величины потерь энергии является ключевым моментом при выборе мероприятий по энергосбережению.

Электрические машины в последнее время всё чаще рассматриваются как объект использования энергосберегающих технологий. Хотя сам по себе потенциал энергосбережения в электрических машинах практически отсутствует (как правило, электрические машины спроектированы на режим максимально возможного КПД), однако при возникшей в последнее время проблеме качества электроэнергии (особенно при высоких уровнях гармонических составляющих), потери в электрических машинах могут достигать достаточно большой величины. Последние негативно сказываются как на энергопотреблении, так и на сроке службы электрических машин, который снижается вследствие превышения допустимой температуры изоляции обмоток.

Определение величины потерь в электрических машинах является достаточно сложной задачей. Если с определением величины потерь в меди проблем, как правило, не возникает, то определение потерь в стали становится достаточно трудоемкой задачей, поскольку потери в стали обусловлены как конструктивными параметрами машины, так и магнитными свойствами электротехнической стали, используемой в магнитопроводе.

Различают два типа потерь в стали:

- потери на гистерезис;
- потери, обусловленные вихревыми токами.

Потери на гистерезис обусловлены величиной остаточной намагниченности и характеризуются величиной коэрцитивной силы – значением напряженности магнитного поля, необходимой для снятия остаточной намагниченности.

Величина потерь от вихревых токов обусловлена, как правило, конструкцией магнитопровода, а также скоростью изменения величины магнитной индукции в магнитопроводе.

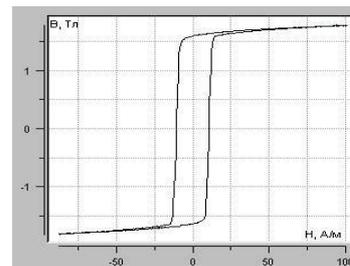
Вихревые токи, помимо нагрева магнитопровода, оказывают еще одно негативное влияние: вектор магнитной индукции вихревого тока противоположно направлен основному магнитному потоку. В результате общее значение магнитного потока уменьшается, что сказывается на величине коэффициента полезного действия электрической машины.

Одной из основных характеристик магнитного материала является кривая намагничивания (статическая характеристика), и её следствие - петля гистерезиса (динамическая характеристика). Петля гистерезиса магнитного материала представлена на рис. 1.

Петля гистерезиса характеризует потерю энергии на перемагничивание и пропорциональна площади петли гистерезиса.

Следует отметить, что значение магнитной индукции при снятии петли гистерезиса с образца электротехнической стали будет учитывать потери не только на гистерезис, но и на вихревые токи. Таким образом, петля гистерезиса, снятая с образца магнитного материала, будет характеризовать потери в стали.

Рис. 1. Петля гистерезиса магнитного материала



Предлагаемый способ снятия петли гистерезиса магнитного материала отличается тем, что для его реализации нет необходимости иметь две магнитосвязанные катушки.

Данный способ, на основании конструктивных параметров катушки (длина средней линии, площадь сечения магнитопровода и пр.), а также осциллограмм тока и напряжения, позволяет построить петлю гистерезиса. Для вычисления параметров петли гистерезиса достаточно снять один период колебаний тока и напряжения в любой момент времени.

В основе способа лежит взаимосвязь между электрическими и магнитными параметрами.

Для определения напряженности магнитного поля используется теорема о циркуляции вектора напряженности:

$$\oint B dL = \sum_{i=1}^n I_i. \quad (1)$$

Для замкнутого магнитопровода, одинакового по всей длине средней линии сечения, теорема (1) будет выглядеть следующим образом:

$$H = \frac{IW}{l}, \quad (2)$$

где I – ток, протекающий по катушке; W – число витков; l – длина средней линии магнитопровода.

Вычисление магнитной индукции происходит в несколько этапов:

1. Вычисляется ЭДС самоиндукции по выражению

$$E_{cu} = I \cdot R - U, \quad (3)$$

где I – ток, протекающий по катушке; R – активное сопротивление катушки; U – приложенное напряжение.

2. Производится численное интегрирование функции ЭДС самоиндукции $\int E_{cu} dt$, результатом которой является потокосцепление Ψ .

3. На основании значения потокосцепления Ψ , а также конструктивных параметров катушки производится вычисление значения магнитной индукции:

$$B = \frac{\Psi}{WS}, \quad (4)$$

где W – число витков; S – площадь сечения магнитопровода.

Следует отметить, что в выражениях (1) – (4) значения периодически изменяющихся величин – это мгновенные значения.

Структурная схема способа в программе *MATLAB*, приложении *Simulink* приведена на рис. 2.

Данный способ был использован для снятия петли гистерезиса низковольтного трансформатора. Диаграммы тока и напряжения вторичной обмотки трансформатора представлены на рис. 3, а (для опыта была использована только одна обмотка – вторичная). На рис. 3, б представлена петля гистерезиса, полученная при помощи предложенного способа.

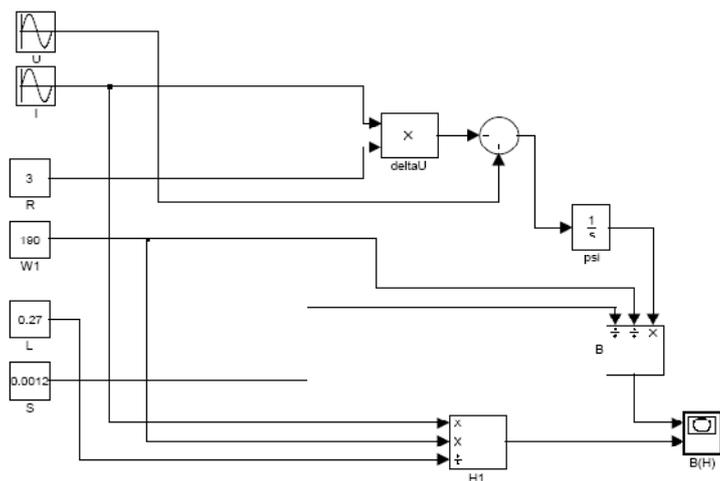
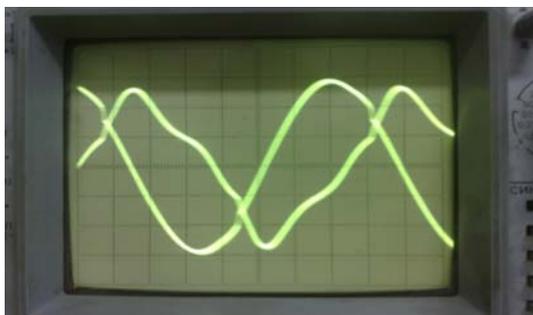
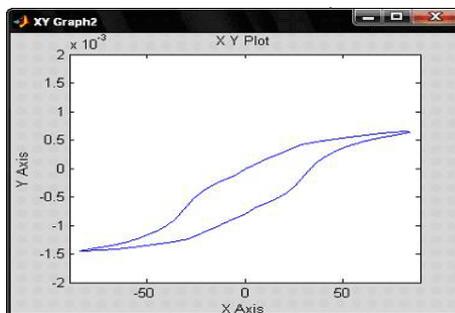


Рис. 2. Структурная схема метода



а



б

Рис. 3. Опытные данные:

а – осциллограммы тока и напряжения; б – петля гистерезиса.

Данный способ имеет следующие преимущества:

- отсутствуют операции численного дифференцирования;
- отсутствует необходимость наличия магнитосвязанных катушек;

– нет необходимости производить специальный опыт. Для трансформатора петля может быть снята при сетевом напряжении, при разомкнутой вторичной обмотке на основании осциллограмм тока и напряжения.