

Е.Г. КОРОЛЬ, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков
В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук., проф., зав. каф., НТУ "ХПИ",
Харьков

ОЦЕНКА НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТА ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ (Часть 1)

Отримано оцінки відхилення від синусоїди кривої вихідного сигналу електромагніту компенсатора, що містить котушку та ферромагнітне осердя, при вхідному синусоїдальному сигналі і нелінійній кривій намагнічення осердя. Запропоновано аналітична функція корекції, що забезпечує синусоїдальну форму вихідного сигналу електромагніта. Результати рекомендовано для використання при проектуванні автоматичних систем високоточної компенсації магнітного моменту електроустаткування.

Получены оценки отклонения от синусоиды кривой выходного сигнала электромагнита компенсатора, содержащего катушку и ферромагнитный сердечник, при входном синусоидальном сигнале и нелинейной кривой намагничивания сердечника. Предложена аналитическая функция коррекции, обеспечивающая синусоидальную форму выходного сигнала электромагнита. Результаты рекомендованы для использования при проектировании автоматических систем высокоточной компенсации магнитного момента электрооборудования.

Введение. Для решения проблемы электромагнитной совместимости силового электрооборудования (ЭО) со слаботочными элементами автоматики, чувствительными к магнитному полю ЭО частоты сети [1-3] в настоящее время разрабатываются параметрические системы автоматической компенсации магнитного поля. Исполнительными элементами этих систем являются электромагниты компенсаторы (ЭК). Конструктивно ЭК выполняется в виде цилиндрической катушки с ферромагнитным сердечником (ФС). Ферромагнитный сердечник выполняется с возможностью его перемещения относительно центра катушки. Компенсирующий магнитный момент (ММ) усиливается ФС и его величина регулируется при перемещении сердечника относительно центра катушки либо изменением тока катушки. Степень усиления ММ катушки ФС характеризуется коэффициентом, который зависит от формы и соотношения его размеров, а также от расстояния между центрами катушки и сердечника. Максимальные величины ко-

эфффициента усиления находятся в диапазоне 5-150 единиц [4]. Именно возможность получения значительного усиления ММ позволяет существенно снижать ампервитки катушки, а, следовательно, и потребление электроэнергии на собственные нужды ЭО, в данном случае на создание компенсирующего магнитного поля. Каждый ЭК настраивается по результатам измерения суммарного магнитного поля ЭО и ЭК из условия обеспечения полной взаимной компенсации их ММ с заданной точностью. В лабораторных условиях на частоте сети достигнута точность компенсации переменного ММ, обеспечивающая эффективность компенсации ММ порядка 300 единиц [5-8].

Однако у ФС есть и недостаток, который проявляется при высокоточной компенсации магнитного поля. Он заключается в том, что вследствие нелинейности характеристик магнитного материала сердечника в частотном спектре компенсирующего магнитного поля ЭК присутствуют дополнительные гармонические составляющие, отсутствующие у поля ЭО. Величины этих составляющих могут превышать требования по величине ММ. В результате наличие дополнительных гармоник ММ приводит к уменьшению реальной эффективности компенсации магнитного поля с помощью ЭК до 10-50 единиц. Следствием этого является невозможность проектирования САК с эффективностью компенсации ММ более 50 единиц. В тоже время, для обеспечения требований электромагнитной совместимости в части внешнего магнитного поля ЭО необходимые величины эффективности компенсации должны приближаться к 100-1000 единиц.

Возможным выходом в этом случае является применение коррекции формы тока и ММ ЭК. Практическая реализация такого подхода возможна на основе применения средств электроники и микропроцессорной техники. При этом ожидается, что при существующей технологии настройки ЭК удастся обеспечить высокие величины эффективности компенсации ММ ЭО.

Цель работы – определение функции коррекции входного сигнала электромагнита компенсатора с ферромагнитным сердечником для повышения эффективности компенсации переменного магнитного момента электрооборудования.

Данная часть 1 работы посвящена анализу физических процессов намагничивания ФС катушки ЭК при питании синусоидальным напряжением, предлагается методика оценки искажений кривой входного сигнала ЭК при выходном синусоидальном сигнале и определяется функция коррекции входного сигнала ЭК.

1 Физические процессы намагничивания ферромагнитного сердечника. Намагничивание ФС происходит в переменном магнит-

ном поле, создаваемом токами частоты 50 Гц, протекающими по катушке ЭК. Моделирование процессов намагничивания является сложной научно-технической задачей, которая в настоящее время не имеет окончательного универсального решения. В электротехнике моделирование этих процессов связано с получением требуемой точности при определенных допущениях, учитывающих как форму сердечника (его геометрию) и взаимное расположение катушки и ФС, так и магнитные свойства материала сердечника, их зависимость от условий технологии изготовления и эксплуатации ЭК.

Форма ФС. В большинстве случаев сердечник ФС выполняется в виде стержня (рис. 1), реже – с дополнительными ферромагнитными элементами на его торцах, расширяющими функциональные возможности сердечника: с торцевыми дисками для увеличения коэффициента усиления (рис. 2) [4] и с составными элементами, расположенными

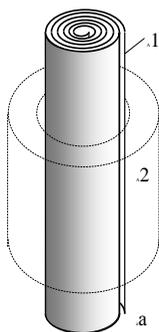


Рис. 1

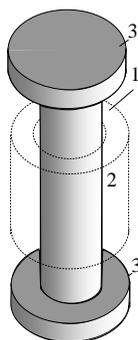
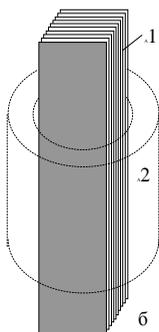


Рис. 2

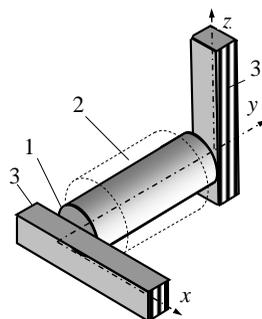


Рис. 3

вдоль осей, ортогональных продольной оси ФС для создания компенсирующего ММ в соответствующих ортогональных направлениях (рис. 3) [9, 10]. На этих рисунках используются обозначения: 1 – ФС; 2 – катушка; 3 – дополнительный ферромагнитный элемент, x , y , z – ортогональные оси. Предполагается, что геометрия ФС известна, либо может быть определена заранее.

В случае ФС цилиндрической формы обеспечивается однородность его магнитных свойств в радиальном направлении, однако усложняется технология изготовления. В случае ФС из пластин в форме параллелепипеда упрощается технология изготовления и практически обеспечивается соответствие паспортных характеристик ферромагнитного материала и сердечника, так как при изготовлении он подвергается минимальной механической обработке и не нарушается структура мате-

риала. Однако если материал листа обладает магнитной анизотропией, т.е. разнородной намагниченностью по различным направлениям, его свойства усиливать магнитный момент зависят от направления.

В зависимости от соотношения длины и площади поперечного сечения ФС (либо определяющего размера – диаметра круга либо стороны квадрата сечения) величина коэффициента усиления может существенно отличаться. Для ФС в форме цилиндра либо призмы квадратного сечения коэффициент усиления достигает 5-50 единиц. Большие величины относятся к сердечникам удлинённой формы. Экспериментально установлено, что применение дополнительных ферромагнитных элементов по торцам сердечника позволяет повысить этот коэффициент до 150 единиц. Приведённые оценки коэффициента усиления ММ ФС являются максимальными, получаемыми при совпадении центров ФС и катушки. Отдельные теоретические обоснования этих величин получены на основе результатов исследований, приведённых в работах [11-15].

Магнитные свойства электротехнических сталей существенно зависят от содержания добавок кремния, технологии изготовления листов и воздействия внешних магнитных полей, в том числе и магнитного поля Земли.

В соответствии с принятыми представлениями о магнетизме ферромагнетиков [16, 17], магнитные свойства ферромагнитных материалов определяются внутренними скрытыми формами движения электрических зарядов. Эти формы движения представляют собой элементарные круговые токи – вращение электронов вокруг собственных осей (электронные спины) и орбитальное вращение электронов в атомах. Явление ферромагнетизма объясняется образованием в объёме (макрообъёме) материала устойчивых микроскопических кристаллических структур (магнитных доменов), в пределах которых электронные спины параллельны и одинаково направлены. Устойчивость доменов обеспечивается при температурах материала ниже точки Кюри. Объёмы этих доменов варьируются в диапазоне (0,001–10 мм³), а пограничные слои между ними могут достигать несколько сот атомных расстояний. Особенностью образования магнитных доменов является то, что они возникают в результате самопроизвольного (спонтанного) упорядочения форм движения внутри домена, без приложения внешнего магнитного поля. Однако пространственные направления магнитных моментов отдельных доменов могут существенно отличаться, что определяется стремлением системы к минимуму энергии. Процессы спонтанного намагничивания характеризуются скачкообразным поворотом оси магнитного момента домена.

Отдельный кристалл ферромагнитного вещества характеризуются

магнитной анизотропией. Она проявляется в том, что величины энергии намагничивания отличаются для различных пространственных направлений, которые связывают с осями намагничивания этого кристалла. У ферромагнитного монокристалла эти оси соответствуют легкому, среднему и трудному намагничиванию и определяются расположением атомов Fe в кристалле (рис. 4). При действии внешнего магнитного поля процесс намагничивания ферромагнитного объема включает два этапа:

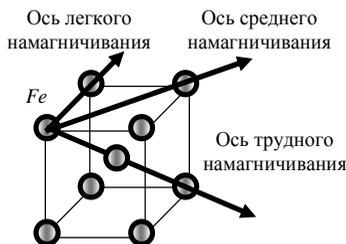


Рис. 4

смещение границ доменов и изменение их ориентации.

Первый этап связан с ростом объемов тех доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением внешнего магнитного поля и уменьшению других доменов. Второй этап заключается в повороте магнитных моментов доменов в направлении внешнего магнитного поля. Четких временных границ этих этапов не существует. Схема,

поясняющая эти этапы намагничивания макрообъема ферромагнетика, приведена на рис. 5 [17]. Объем ферромагнетика представлен тремя доменами, расположенными в одной плоскости и характеризующимися различными электронными спинами (магнитными моментами намагниченности) (рис. 5,а). При воздействии внешнего магнитного поля в направлении H вначале больший домен расширяет свои границы за счет присоединения правого домена (рис. 5,б) и нижнего домена (рис. 5,в), а затем меняет свою ориентацию в соответствии с направлением поля. Ориентация векторов намагниченности на рис. 5,г соответствует насыщенному состоянию домена.

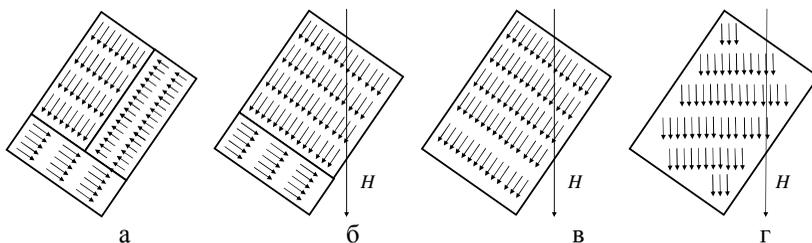


Рис. 5

Процесс намагничивания ферромагнитного материала сопровож-

дается магнитострикцией – изменением линейных размеров. Наибольшее изменение размеров наблюдается в направлении оси легкого намагничивания, и оно определяется в основном величиной напряженности H . По данным [17], при величине внешнего магнитного поля до 20 кА/м относительное отклонение размера изменяется линейно до величины $50 \cdot 10^{-6}$.

В переменном магнитном поле материал сердечника циклически перемагничивается с частотой поля.

Моделирование процессов намагничивания ферромагнитного материала проводится приближенно с использованием зависимостей индукции B либо магнитной проницаемости μ от напряженности H внешнего магнитного поля:

$$B = B(H) = \mu H ; \quad (1)$$

$$\mu = \mu(H) . \quad (2)$$

Зависимость (1) является неоднозначной и определяется как начальным состоянием намагниченности материала, так и направлением процесса (ростом либо уменьшением индукции внешнего магнитного поля). Если пренебречь скачкообразным характером перемагничивания доменов ферромагнетика, эта зависимость получается при его медленном намагничивании во внешнем магнитном поле, вначале нарастающем до некоторого фиксированного значения, а затем спадающем до противоположного значения и снова нарастающего до первоначального значения. Такая зависимость получила название *петли гистерезиса* цикла перемагничивания. Основные параметры петли гистерезиса, построенной на плоскости с осями B и H : точки двух вершин и точки ее пересечения с осями B и H . Существует предельная петля гистерезиса, соответствующая намагничиванию материала до насыщения. В качестве примера на рис. 6 показано множество таких петель гистерезиса, построенных для фиксированных значений напряженности внешнего магнитного поля. Указанные точки обозначены цифрами 1–6, а предельная петля – 7. Как видно на рис. 6, по мере нарастания напряженности внешнего магнитного поля петли гистерезиса претерпевают не только изменение масштаба, но и поворачиваются. В теории ферромагнетизма площадь петли является важной характеристикой ферромагнитного материала, характеризующей потери энергии на перемагничивание.

Поведение вершин промежуточных петель гистерезиса характеризуется линией, соединяющая вершины петель гистерезиса. Геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель называется *основной кривой намагничивания* [18].

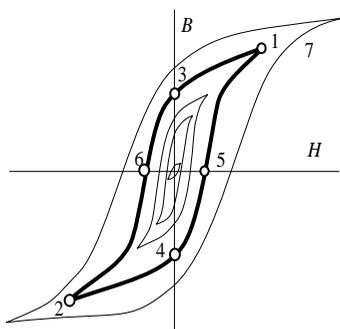


Рис. 6

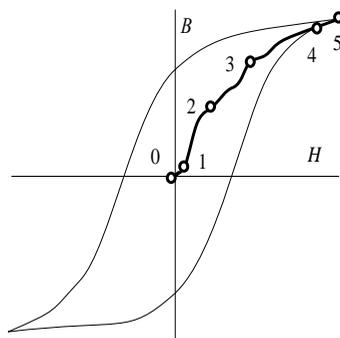


Рис. 7

Особенности этих кривых, которые исследователи пытаются учесть при описании процессов намагничивания, связаны с их поведением при малых, средних и больших величинах напряженности внешнего магнитного поля.

На рис. 7 показаны типичные участки кривой намагничивания ферромагнитного материала (низкоуглеродистая отожженная электротехническая сталь) [19].

В области слабых магнитных полей (участок 0-1) зависимость $B(H)$ линейная. В области средних полей (участки 1-2, 2-3, 3-4) – наблюдаются изгибы (колена), число которых в общем случае может быть до пяти. В настоящее время моделирование намагниченности для области средних полей проводится с учетом наличия только одного колена [19, 20]. Для электротехнических расчетов, для которых погрешность моделирования в пределах 0,05 считается достаточной, такое допущение вполне оправдано. Однако для высокоточных электромагнитов компенсаторов, у которых требование по точности должно быть на уровне 0,01–0,001, такое упрощение неприемлемо. В работах [21, 22] приводятся результаты теоретических исследований по моделированию процесса намагничивания ферромагнитных материалов с редкоземельными включениями, форма кривой намагничивания которых имеет характерное колено в этой области (этот участок называется S-образным, либо двойным S-образным, если рассматриваются и отрицательные величины напряженности внешнего магнитного поля). В области сильных магнитных полей (участок 4-5 и дальше) принимается линейный характер зависимости $B(H)$, характеризующийся насыщением ферромагнитного материала, что является основанием считать его магнитную проницаемость равной магнитной проницаемости вакуума, μ_0 .

Зависимость (2) используется для характеристики магнитного материала как проводника магнитного потока, в частности в переменном

магнитном поле. Соответственно при моделировании используются методы цепей для магнитных систем [23] в стационарных и динамических режимах. Для стационарных магнитных полей возможности моделирования существенно расширены за счет применения специализированных программ расчета, например, Femm [24].

В качестве возмущающего магнитного поля может рассматриваться и магнитное поле Земли. Отдельные результаты исследований для этого случая приведены в работе [25].

Развитие теории намагничивания связано с введением несимметричных кривых намагничивания и петель гистерезиса во всех пространственных направлениях [20], введением динамических петель гистерезиса, учитывающих динамику изменения внешнего магнитного поля [26, 27], а также двойных *S*-образных петель гистерезиса [16, 28].

Анализ перечисленных методов моделирования показывает, что для существующих величин поля и требуемой эффективности его компенсации (примерно 10^4) явлением магнитострикции можно пренебречь. Для области средних магнитных полей известные методы моделирования ограничиваются учетом одного колена кривой намагничивания, что недостаточно даже для качественной характеристики процесса намагничивания ферромагнитного материала при проектировании электромагнитов компенсаторов с указанной повышенной эффективностью компенсации внешнего магнитного поля ЭО. Рассмотренные процессы намагничивания относятся именно к ферромагнитному материалу, без учета формы магнитной системы электромагнита компенсатора, его положения относительно магнитного поля Земли и его магнитной "предыстории" – остаточной намагниченности, приобретенной в процессе изготовления. Оценки величин скачкообразного изменения намагниченности в известной литературе отсутствуют, однако на практике в большинстве случаев ими пренебрегают, ограничиваясь основными кривыми и петлями гистерезиса, т.е. усредненными для большого числа циклических перемагничиваний ферромагнитного материала.

2 Нелинейность кривой намагничивания материала ферромагнитного сердечника. В ЭО с синусоидальными рабочими токами магнитный момент, пропорциональный токам силовой цепи, также изменяется по синусоидальному закону. Это относится к низковольтным распределительным устройствам, автоматическим выключателям, силовым шинопроводам. Для обеспечения высокой эффективности компенсации их магнитного момента требуется, чтобы компенсирующий магнитный момент, создаваемый с помощью ЭК, также формировался по синусоидальному закону. Это требование практически невозможно обеспечить при наличии ферромагнитного сердечника в ЭК

вследствие нелинейности его характеристик – кривой намагничивания и петли гистерезиса.

В существующих параметрических системах автоматической компенсации ЭК подключается к источнику синусоидального напряжения достаточной мощности [4]. Поэтому напряжение, подаваемое на вход ЭК можно считать синусоидальным. При этом индукция в сердечнике описывается синусоидальной функцией вида

$$B(t) = B_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

где t – время процесса; B_m – амплитуда индукции; ω – циклическая частота напряжения питания.

В случае нелинейной кривой намагничивания материала ферромагнитного сердечника последним осуществляется нелинейное преобразование функции (1) в напряженность поля $H(t)$. В графическом представлении это преобразование синусоидального сигнала $B(t)$ имеет вид, приведенный на рис. 8.

Для упрощения показана кривая намагничивания с одним коленом. Этапы графического построения кривой напряженности магнитного поля показаны на примере трех точек: 0,1,2 – точки на кривой индукции: 0',1',2' – точки на кривой намагничивания; 0'',1'',2'' – точки на кривой напряженности. Графический метод применим для любой кривой намагничивания ферромагнитного материала, включая и его намагничивание при одновременном действии нескольких источников магнитного поля, например, поля катушки с током и магнитного поля Земли.

Передаточная функция ЭК по магнитному полю определяется как зависимость выходного сигнала – напряженности магнитного поля $H(t)$, от входного сигнала – индукции магнитного поля $B(t)$:

$$H(t) = H(B(t)). \quad (4)$$

Для точного учета нелинейности передаточной функции (4) рекомендуется ее задание по экспериментальным данным с последующим разложением в ряд Фурье [29]. В случае действия только переменного магнитного поля катушки передаточная функция $H(t)$ является нечетной и представляется в виде суммы отрезка ряда Фурье с нечетными номерами гармоник:

$$H(t) = \sum_{k=1}^K H_{mk} \sin(k\omega t), \quad (5)$$

где k – номер гармоники напряженности; K – число учитываемых гармоник; H_{mk} – амплитуда гармоники напряженности, определяемая на основе экспериментальных данных.

Для оценки несинусоидальности передаточной функции (5) можно воспользоваться коэффициентами, характеризующими форму неси-

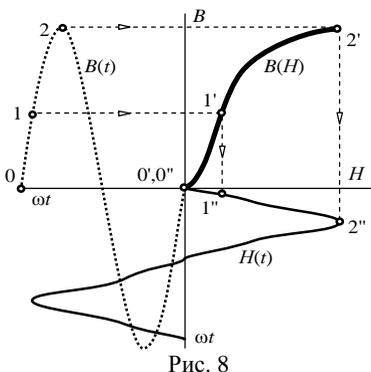


Рис. 8

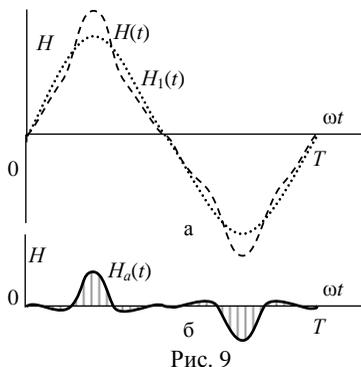


Рис. 9

нусоидальной периодической кривой: коэффициентом искажений k_d (distortion factor) и коэффициентом гармоник k_h (harmonic factor) [30]:

$$k_d = \frac{H_1}{H_K}; \quad k_h = \frac{H_{K-1}}{H_1} \quad (6)$$

где H_1 – действующее значение первой гармоники; H_K – полное действующее значение функции напряженности поля, определенное для первых K гармоник; H_{K-1} – действующее значение всех высших гармоник, кроме первой и нулевой,

$$H_K = \sum_{k=0}^K H_k^2; \quad H_k = \frac{H_{mk}}{\sqrt{2}}; \quad H_{K-1} = \sqrt{H_K^2 - H_0^2 - H_1^2}.$$

Коэффициенты (6) служат ориентировочными оценками использования энергии магнитного поля на периоде T частоты сети, без учета формы кривой для передаточной функции и фазовых сдвигов ее гармонических составляющих.

Для характеристики в любой момент времени предлагается использовать функцию несинусоидальности $H_a(t)$, определяемую по соотношению:

$$H_a(t) = H(t) - H_1(t), \quad (7)$$

где $H_1(t)$ – синусоидальная функция первой гармоники поля.

Для наглядности на рис. 9, а приведена функция несинусоидальности (7) для кривой намагничивания с одним коленом.

Для того, чтобы выходной сигнал ЭК был синусоидальными, необходимо на его вход подавать дополнительный корректирующий сигнал $B_c(t)$. Получение точного описания этой функции коррекции представляет собой сложную самостоятельную задачу. В данной работе приближенное значение корректирующей функции предлагается получать на основании

обратного нелинейного преобразования функции напряженности (синусоиды) по кривой намагничивания и вычитании из нее первой гармоники индукции. Для получения корректирующей функции в этом случае требуется нелинейная зависимость $B(H)$.

3 Моделирование нелинейности кривой намагничивания. Для моделирования принимается, что выходной сигнал напряженности имеет форму синусоиды с амплитудой $H_m = 640$ А/м. Отсчет времени начинается с момента $t = 0$. Функция напряженности поля имеет вид

$$H(t) = H_1(t) = 640 \sin(\theta), \quad (8)$$

где θ – приведенное время, $\theta = \omega t$.

Основная кривая намагничивания для выбранного материала сердечника задана в виде табл. 1.

Таблица 1

B , Тл	H , А/м	B , Тл	H , А/м	B , Тл	H , А/м
0	0	0,386	138,54	0,772	248,47
0,055	46,68	0,441	150,59	0,828	278,59
0,110	70,02	0,497	165,65	0,883	323,76
0,166	90,35	0,552	179,2	0,938	380,24
0,221	105,41	0,607	192	0,993	442,73
0,276	116,71	0,662	209,32	1,048	534,59
0,331	126,49	0,717	224,38	1,103	640

Кривая индукции, полученная обратным преобразованием по кривой намагничивания, может быть представлена в виде гармонического ряда. Для заданной функции напряженности (8) и кривой намагничивания (табл. 1) она имеет вид:

$$B(t) = 1,29 \text{Isin}(\theta) + 0,267 \text{Isin}(3\theta) + 0,12 \text{Isin}(5\theta) + 0,065 \text{Isin}(7\theta) + 0,042 \text{Isin}(9\theta) + 0,03 \text{Isin}(11\theta) + 0,026 \text{Isin}(13\theta) + 0,026 \text{Isin}(15\theta) + 0,026 \text{Isin}(17\theta). \quad (9)$$

Коэффициенты искажений k_d и гармоник k_h , рассчитанные по соотношениям, аналогичным (6), для функции (9), равны $k_d = 0,973$, $k_h = 0,239$.

В рассматриваемом примере вклад только третьей гармоники, определяющий приближенно коэффициент k_h как отношение третьей и первой гармоник, составляет величину $(0,267/1,291) = 0,207$. Сравнение этих коэффициентов показывает, что коэффициент гармоник более точно характеризует состав и величины гармоник по сравнению с коэффициентом искажений.

Корректирующая функция может быть представлена в виде ряда, коэффициенты которого выражаются в относительных единицах, по-

лученных приведением к амплитуде первой гармоники индукции,

$$B_c(t) = B_{1m} \sum_{n=3}^N B'_{nm} \sin(n\theta) \quad (10)$$

где B_{1m} – амплитуда первой гармоники индукции; n – номер гармоники, $n = \overline{(1, N)}$; N – число учитываемых гармоник; B'_{nm} – приведенная амплитуда n -й гармоники индукции, $B'_{nm} = B_{nm} / B_{1m}$.

Применение приведенных величин гармоник индукции существенно упрощает оценку скорости сходимости гармонического ряда.

Корректирующая функция с учетом (9) и (10) может быть представлена в виде:

$$B_c(t) = 1,29 [0,207\sin(3\theta) + 0,094\sin(5\theta) + 0,050\sin(7\theta) + 0,033\sin(9\theta) + 0,024\sin(11\theta) + 0,020\sin(13\theta) + 0,020\sin(15\theta) + 0,020\sin(17\theta)]. \quad (11)$$

График корректирующей функции (11) показан на рис. 10.

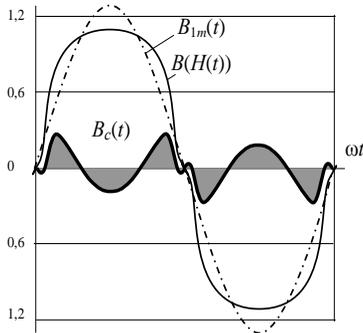


Рис. 10

В соотношении (11) отсутствуют четные гармоники, поскольку зависимость индукции от времени представлена нечетной функцией. Анализ соотношения (11) показывает, что, с точки зрения достижения требуемой точности представления корректирующей функции гармонический ряд сходится достаточно медленно: амплитуды высших гармоник, начиная с номера 11, находятся на уровне 2 % от величины первой гармоники. В этой связи при

определении числа учитываемых членов ряда Фурье необходимо оценить остаточный член ряда исходя из условия, что его величина не превышает требуемой точности описания функции коррекции. Вопрос использования ряда Фурье для описания функции коррекции с высокой точностью требует отдельного исследования.

Выводы.

1. Проведен анализ физических процессов намагничивания ферромагнитного сердечника в составе электромагнита, предназначенного для компенсации переменного магнитного момента электрооборудования. При этом погрешность определения магнитного момента составляет 5-20 %. В ряде случаев для обеспечения современных требований электромагнитной совместимости технических средств требуется снижение магнитного момента в 100 и более раз. В этой связи для

электромагнита компенсатора актуальной становится задача повышения точности моделирования процессов намагничивания его сердечника, в частности, за счет повышения точности описания его передаточной функции.

2. Для оценки нелинейности передаточной функции электромагнита компенсатора в случае, когда функция представлена кривой намагничивания материала ферромагнитного сердечника, предложено использовать параметры и функцию нелинейности, представленную отрезком ряда Фурье и характеризующую форму периодического несинусоидального сигнала. В качестве параметра рекомендуется использовать коэффициент гармоник, а в качестве функции нелинейности – зависимость отклонения передаточной функции от синусоиды.

3. Получена оценка коэффициента гармоник, а также корректирующая функция для ферромагнитного материала, позволяющая линейаризовать передаточную функцию электромагнита компенсатора.

4. Для представления с высокой точностью функции коррекции в его остаточного члена и выбор числа учитываемых гармоник исходя из условия, что величина остаточного члена ряда не превышает требуемой точности описания функции коррекции.

Список литературы: 1. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Введ. 01.01.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с. 2. ІЕС 1000-4-8: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring techniques – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p. 3. *Луников В.С.* Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплексних пристроїв. – Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.01. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків, 2003. – 36 с. 4. *Коваленко А.П.* Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1975. – 248 с. 5. *Розов В.Ю., Волохов С.А., Луников В.С., Кильдишев А.В., Ерисов А.В.* Технология снижения внешних магнитных полей судового электрооборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению "ISC'98". – Т. 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 22-27. 6. *Розов В.Ю., Волохов С.А., Ерисов А.В.* Повышение эффективности размагничивающих устройств корабля // Технічна електродинаміка. – 2000. – Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – С. 7-12. 7. *Розов В.Ю., Волохов С.А., Ерисов А.В.* Электромагнитный компенсатор магнитных полей технических объектов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – № 15. – С. 191-197. 8. *Розов В.Ю.* Анализ эффективности параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 2002. – №2. – С. 3-10. 9. *Король Е.Г.* Компенсатор переменного магнитного момента токов автоматического выключателя // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 24. – С. 38-42. 10. Пат. 31677,

Україна, МПК G01R 33/00. Пристрій для компенсації змінного магнітного моменту струмів / О.Г. Король, В.С. Лупіков, О.Г. Серета, М.Ю. Гридин, В.Ю. Розов. – № u200708718. Заявлено 30.06.2007. Опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 3 с. **11.** *Гордон А.В., Сливинская А.Г.* Поляризованные электромагниты. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 120 с. **12.** *Фрадкин В.М., Гусейнова Т.И.* Магнитное поле (внутри и вне сердечника) катушки с нелинейным магнитопроводом // Тр. Моск. энерг. ин-та, 1974. – Вып. 171. – С. 59-73. **13.** *Вострошлов Р.С.* Расчет магнитных полей в кусочно-однородных средах анализ эффективности параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов // Тр. Новочерк. политехн. ин-та, 1971. – Т. 236. – С. 14-18. **14.** *Гендлер М.Б., Розенблат М.А., рубчинский А.А.* Магнитное состояние разветвленных сердечников // Автоматика и телемеханика. – 1971. – №5. – С. 168-175. **15.** *Иссерлис Ю.Э., Урьев А.М.* Моделирование магнитного поля тела произвольной формы с помощью системы элементарных источников // Электричество. – 1985. – №6. – С. 67-69. **16.** *Вонсовский С.В.* Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримангнетиков. – М.: Наука, 1971. – 1032 с. **17.** *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы. – Л.: Энергия, 1977. – 352 с. **18.** Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с. **19.** Основы теории электрических аппаратов / Буль Б.К., Буткевич Г.В., Годжелло А.Г. и др. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с. **20.** *Курбатов П.А., Аринчин С.А.* Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с. **21.** *Ismail A. Mohammed, Bakir A.R. Al-Hashemy, Mohammed A.Tawfik.* A Fourier descriptor model of hysteresis loops for sinusoidal and distorted waveforms // IEEE Transactions on magnetics. – 1997. –Vol. 33. – No. 1. – P. 686-691. **22.** *Robert G. Harryson.* Variable-domain-size theory of spin ferromagnetism // IEEE Transactions on magnetic. – 2004. –Vol. 40. – No. 3. – P. 1506-1515. **23.** *Таев И.С.* Электрические аппараты. Общая теория. – М.: Энергия, 1977. – 277 с. **24.** *Буль О.Б.* Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM / Буль О.Б. – М.: Изд. центр "Академия", 2005. – 336 с. **25.** *Белов С.В и др.* Влияние постоянного магнитного поля Земли на проницаемость сердечника // Геофизическое приборостроение. – Л.: Недра, 1970. – Вып. 44. – С. 41-47. **26.** *Кифер И.И.* Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1969. – 360 с. **27.** *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы. – Л.: Энергия, 1977. – 352 с. **28.** *Ismail A. Mohammed, Bakir A.R. Al-Hashemy, Mohammed A.Tawfik.* A Fourier descriptor model of hysteresis loops for sinusoidal and distorted waveforms // IEEE Transactions on magnetic. – 1997. –Vol. 33. – No. 1. – P. 686-691. **29.** *Король Е.Г.* Анализ методов моделирования магнитных характеристик электромагнитов для компенсации магнитного поля электрооборудования // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2007. – №2. – С. 31-34. **30.** Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов. В трех т. Под общ. ред. К.М. Поливанова. Т. 1. К.М. Поливанов. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными М.: Энергия, 1972. 240 с.

Поступила в редколлегию 10.03.2009