

В.С. ЛУПИКОВ¹, д-р техн. наук
Н.В. КРЮКОВА¹
А.В. ГЕТЬМАН², канд. техн. наук
Ю.Д. РУДАС², канд. техн. наук
А.В. ЕРИСОВ²
Л.Ф. ИВЛЕВА²

¹Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт" (Харьков)

²Научно-технический центр "Магнетизм технических объектов" НАН Украины (Харьков)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МАГНИТОФАЗНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Приведено результати експериментальних досліджень трифазного електроустаткування, що підтверджують вплив порядку чергування фаз живлення на його змінний магнітний момент. Показано, що причиною є наявність асиметрії розташування пасивних джерел магнітного поля відносно активних джерел.

Приведены результаты экспериментальных исследований трехфазного электрооборудования, подтверждающие влияние порядка чередования фаз питания на его переменный магнитный момент. Показано, что причиной является наличие асимметрии расположения пассивных источников магнитного поля относительно активных источников.

Введение. При исследовании переменного внешнего магнитного поля трехфазного электрооборудования в рамках проблемы электромагнитной совместимости был обнаружено, что величина напряженности поля зависит не только от величин токов и напряжений электрооборудования, но и от того, каков порядок чередования их фаз. Этот эффект крайне нежелателен, а иногда просто недопустим для электрооборудования с нормированными величинами внешнего магнитного поля. Зависимость величины поля от порядка чередования фаз была зафиксирована экспериментально у различных видов силового электрооборудования: электрических машин, силовых щитов, полупроводниковых преобразователей, трансформаторов мощностью до 1000 кВт. Уровень напряженности поля менялся скачком в 2-3 раза при изменении только порядка чередования фаз при прочих неизменных условиях. Результаты исследований оказались неожиданными, поскольку пространственное положение источников магнитного поля электрообору-

дования, величины питающих токов и напряжений не менялись.

Первое теоретическое объяснение было предложено Финкельштейном В.Б. в 1979 г. для электрических машин, работающих в режиме реверса [1, 2]. Возникновение этого эффекта объяснялось анизотропией магнитной системы электрической машины, которая, в свою очередь, обусловлена анизотропией листов электротехнической стали – различии величин намагничивания для разных направлений у листа стали, с преимущественным намагничиванием вдоль направления его прокатки. Существующая технология изготовления магнитной системы приводит к тому, что ось ее суммарного наибольшего намагничивания может быть произвольно сдвинута относительно результирующей оси прокатки листов стали пакета. Сочетание произвольного расположения оси обмотки статора относительно этой оси наибольшего намагничивания и асимметрия напряжений сети превращают круговое вращающее поле в зазоре машины в эллиптическое. Реверс вращения электрической машины обеспечивается переключением двух фаз питания и направление пульсирующей составляющей эллиптического поля зеркально отображается относительно оси третьей фазы, а величина пульсирующей составляющей изменяется вследствие анизотропии стали. Как результат – перераспределение направления максимума напряженности поля в пространстве и его величины при реверсе электрической машины. Такое объяснение влияния порядка чередования фаз на магнитное поле справедливо для электрической машины, но не подходит для других видов силового электрооборудования.

Анализ внешнего магнитного поля трехфазных распределительных устройств, у которых в конструкции использованы слабонамагниченные стали и отсутствует магнитная анизотропия, позволил выдвинуть гипотезу о том, что за счет индуктивных связей контуров силовой цепи и каркаса максимум переменного магнитного поля зависит от порядка чередования фаз питания. Теоретическое объяснение для переменного магнитного момента, характеризующего дипольную составляющую внешнего магнитного поля предложено с участием авторов в 1994 г. [3]. Последующие теоретические исследования позволили разработать теорию влияния электропроводящей рамочной конструкции на переменный магнитный момент трехфазного распределительного устройства и его зависимость от порядка чередования фаз [4-6]. В работе [4] этот эффект назван магнитофазным, чтобы подчеркнуть его отличие от эффекта, вызванного анизотропией магнитных систем электрооборудования. В качестве простейшей модели рассматривался трехфазный плоский шинопровод и замкнутый накоротко контур, имитирующий рамочную конструкцию каркаса шкафа трехфазного распределительного устройства. Термином "рамочная конструкция"

обозначена система токопроводящих элементов электрооборудования, электрически изолированных от силовой цепи. Примеры рамочной конструкции: в распределительном устройстве и полупроводниковом преобразователе – каркас, выполненный из электропроводного материала (в том числе и стали), плоские панели и другие элементы, предназначенные для транспортировки шкафа, токопроводящие элементы крепления и систем охлаждения; в электрической машине и трансформаторе – корпуса, кожухи и другие токопроводящие элементы. Магнитный момент представлялся в виде двух составляющих; первая обусловлена протеканием токов по силовой цепи, вторая – от вихревых токов, индуцированных в рамочной конструкции. Показано, что при асимметричном расположении рамочной конструкции относительно шинопроводов пространственный сдвиг вектора магнитного момента токов рамочной конструкции относительно вектора магнитного момента силовой цепи не обладает свойством зеркального отражения (относительно оси непереключаемой фазы) и зависит от порядка чередования фаз питания. Вследствие этого суммарный магнитный момент токов силовой цепи и рамочной конструкции меняется по величине (и фазе) при изменении порядка чередования фаз.

Цель работы – экспериментальное подтверждение магнитофазного эффекта.

Физическая модель для экспериментальных исследований. Физическая модель выполнена из двух частей: плоского трехфазного шинопровода, составленного из прямолинейных отрезков, и рамки квадратной формы. Обе части выполнены из медных шин сечением 6×80 мм.

Трехфазный шинопровод представляет собой три параллельные прямолинейные шины длиной 1,6 м, расположенные в горизонтальной плоскости и удаленные друг от друга на 0,18 м. Для изменения порядка чередования фаз используется магнитный пускатель, выход которого подключается к началам трех шин с помощью кабелей. Концы трех шин замкнуты накоротко с помощью отрезков кабелей диаметром 20 мм^2 ; все соединения – болтовые.

Рамка имеет форму квадрата со стороной 1 м, выполнена из медной шины и спаяна (для обеспечения малого активного сопротивления). Рамка и трехфазный шинопровод расположены в параллельных плоскостях, удаленных на расстояние 0,08 м. Рамка имеет возможность сдвига от центра в своей плоскости и поворота относительно центральной оси на угол 45^0 .

Варианты расположения рамки и трехфазного шинопровода физической модели приведены на рис. 1, а-в. Вариант (а) соответствует симметричному расположению рамки и трехфазного шинопровода. В варианте (б) контур рамочной конструкции сдвинут относительно центральной шины трехфазного шинопровода на расстояние 0,32 м, при котором сто-

рона квадратной рамочной конструкции располагается над крайней шиной шинпровода. Вариант (в) получен из варианта (б) путем дополнительного поворота рамки вокруг оси.

Оси системы координат, принятой при измерениях магнитного момента, имеют обозначения x , y , z ; O – начало системы координат, совпадающее с центром трехфазного шинпровода; O_c , O_a – центр рамы при ее симметричном и асимметричном расположении относительно центра трехфазного шинпровода; l – смещение по оси y центра рамки относительно центра трехфазного шинпровода; МП – магнитный пускатель. Выводы кабелей питания шинпровода показаны стрелками.

Методика исследований. Экспериментальные исследования включали измерение вертикальной компоненты магнитного момента физической модели и тока рамки для трех основных вариантов расположения трехфазного шинпровода.

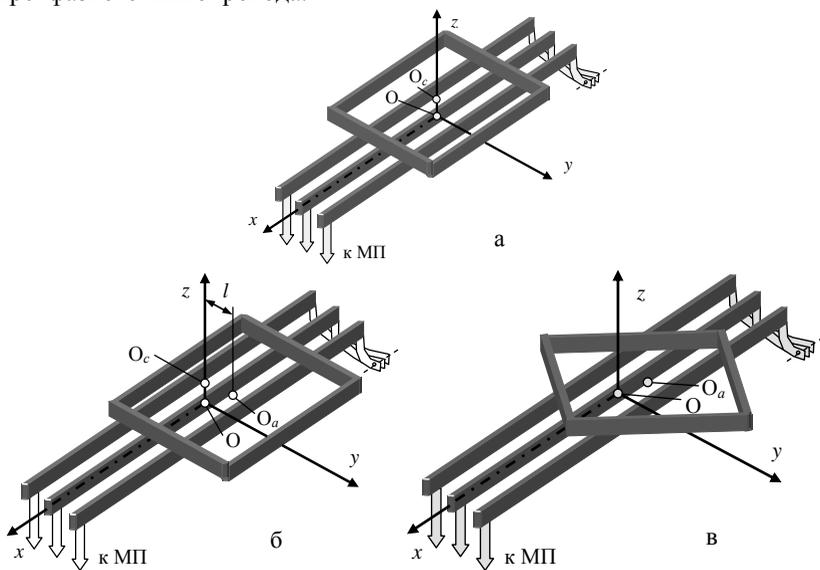


Рис. 1

При проведении измерений магнитного момента использована методика [7]. Методика измерений включает:

- установку первичных преобразователей согласно выбранной схеме измерений на удалении R от центра исследуемого объекта, при котором составляющие пространственных гармоник магнитного поля порядка выше двух ограничивается до заданного уровня;

- ориентацию первичных преобразователей согласно измеряемой компоненте магнитного момента;
- компенсацию сигнала помехи в измерительной системе от внешних источников магнитного поля на измеряемой частоте;
- компенсацию в измерительной системе составляющей магнитного поля питающего кабеля;
- измерение компоненты переменного магнитного момента.

Схема измерений с четырьмя сосредоточенными первичными преобразователями приведена на рис. 2. Согласно схеме измерений, обмотки преобразователей включаются электрически последовательно. Суммарный сигнал поступает на вход пульта управления измерителя и с его выхода – на анализатор частот. Калибровка системы измерений проводится с использованием образцового источника магнитного момента – меры магнитного момента.

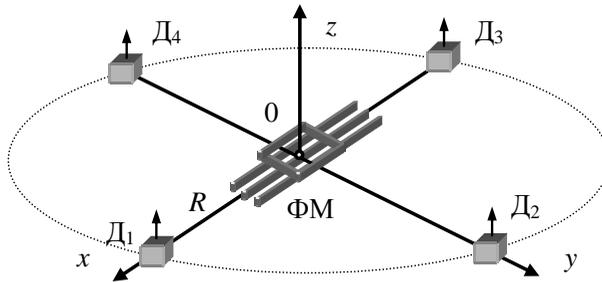


Рис. 2

Экспериментальные исследования. При проведении экспериментальных исследований использовалось штатное оборудование магнитоизмерительного стенда Научно-технического центра "Магнетизм технических объектов" НАН Украины. Условия стенда исключали возникновение наведенных магнитных помех за счет отсутствия намагничивающихся ферромагнитных масс вблизи рабочего объема, внутри которого помещалась физическая модель. Питание осуществлялось от индукционного генератора напряжением 380 В частотой 50 Гц, пуск и управление выходным током которого обеспечивалось со штатного пульта управления. Действующее значение тока фазы менялось в диапазоне 0,1-90 А. Изменение порядка чередования фаз питания обеспечивалось с помощью магнитного пускателя, удаленного от рабочего объема магнитоизмерительного стенда на расстояние 5 м.

Система измерений магнитного момента состоит из четырех трехкомпонентных первичных преобразователей, пульта управления измере-

ниями и анализатора частот. На фото рис.3 приведено расположение первичных преобразователей относительно физической модели, на фото рис. 4 – анализатор частот (вверху) и пульт управления измерениями (внизу). Преобразователи конструктивно выполнены одинаковыми и установлены на координатном устройстве, обеспечивающем расположение в горизонтальной плоскости и индивидуальную регулировку их удаления от центра O рабочего объема измерительной системы. Преобразователи располагались на осях координат x и y измерительной системы и удалены от центра на расстояние $R = 3,2$ м, что превышает габарит физической модели в два раза. В экспериментах использовались измерительные обмотки первичных преобразователей, ориентированные по оси z , так как физическая модель характеризуется только одной компонентой переменного магнитного момента вдоль этой оси. Стрелками указаны первичные преобразователи $D_1 - D_4$ и физическая модель ФМ.

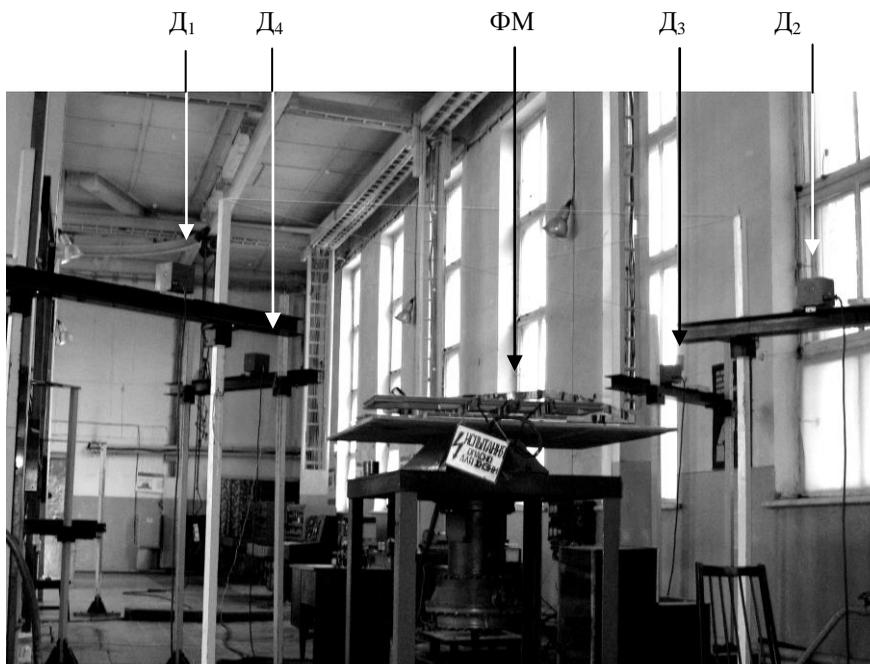


Рис. 3.



Рис. 4

Пульт управления измерителя обеспечивает выбор режима работы измерительной системы (калибровка либо измерение), выбор измеряемой компоненты магнитного поля (магнитного момента) и компенсацию в измерительной системе сигнала помехи от поля кабелей и помехи, создаваемой в рабочем объеме измерительной системы внешними источниками поля. При измерениях использован анализатор частот фирмы Брюль и Кьер типа 2120.

В экспериментальных исследованиях не учитывалось влияние ферромагнитных материалов рамочной конструкции на магнитный момент трехфазного электрооборудования.

При установленном удалении первичных преобразователей и физической модели обеспечивается оптимальное соотношение полезного сигнала и помехи. Кроме того, сигнал измерительной системы формируется преимущественно дипольной пространственной гармоникой, пропорциональной магнитному моменту, а высшие пространственные гармоники ограничены на заданном малом уровне.

Компенсация помехи от внешних источников поля проводилась на измеряемой частоте до и после каждого опыта для того, чтобы удостовериться в ее стационарном характере и отсутствии динамических составляющих. Для компенсации поля питающего кабеля его выводы замыкались на зажимах шинпровода физической модели и с помощью пульта управления формировались компенсирующие сигналы на входе измерительного прибора – анализатора частот.

Перед началом экспериментов проводилась калибровка измерительной системы на частоте 50 Гц. Коэффициент пересчета напряжения анализатора частот в магнитный момент составил величину $0,437 \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{мВ}$. Измеренная максимальная величина помехи от внешних источников магнитного поля после ее компенсации не превышала 250 мкВ, что в пересчете в магнитный момент составляет $0,11 \text{ А}\cdot\text{м}^2$.

Измерение токов проводилось с помощью измерительных клещей.

Обработанные результаты измерений компоненты переменного магнитного момента физической модели и тока рамки приведены в табл. 1. Ток рамки при изменении порядка чередования фаз не менялся для каждого из токов питания и в табл. 1 приведено его одно значение.

На рис. 5 приведены зависимости магнитного момента от величины тока трехфазного шинпровода: $M_r(I)$ – для прямого порядка чередования фаз; $M_i(I)$ – для обратного порядка чередования фаз. Измеренные величины в точках показаны кружком и квадратом соответственно для прямого и обратного порядка чередования фаз.

Обсуждение результатов эксперимента. При симметричном расположении рамочной конструкции относительно трехфазного шинпровода (вариант а) величина магнитного момента практически не меняется при изменении порядка чередования фаз. Незначительное отличие магнитных моментов (до 3 %) объясняется погрешностью измерений и асимметричным выполнением перемычек на концах шинпровода. Зависимости магнитного момента от тока трехфазного шинпровода $M_r(I)$ и $M_i(I)$ при прямом и обратном порядке чередования фаз являются линейными, что

Таблица 1 – Данные измерений магнитного момента и тока рамки

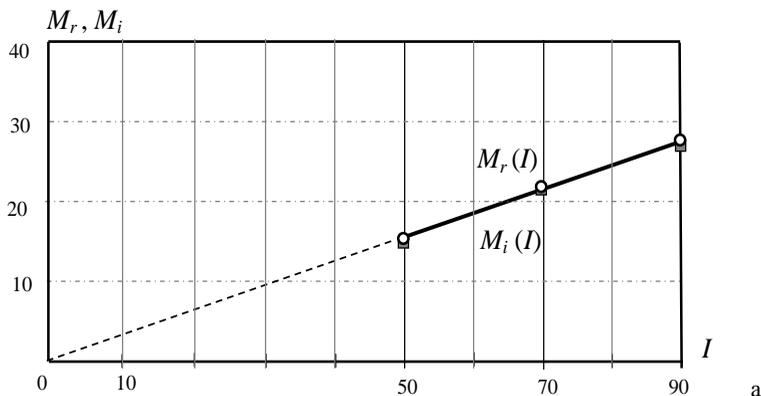
Вариант расположения рамочной конструкции относительно трехфазного шинпровода (рис. 1)	Ток питания физической модели, А	Ток рамки, А	Магнитный момент в зависимости от порядка чередования фаз токов питания, $\text{А}\cdot\text{м}^2$		Отношение магнитных моментов M_r/M_i
			прямой, M_r	обратный, M_i	
а	50	5,25	15,30	15,25	1,02
	70	7,50	21,85	21,45	1,02
	90	9,75	27,97	27,04	1,03
б	50	6,30	15,30	12,93	1,18
	70	8,25	20,76	17,70	1,17
	90	11,00	26,22	23,06	1,14
в	50	5,80	16,61	13,24	1,25
	70	7,80	22,29	17,92	1,24
	90	10,00	28,4	22,7	1,25

совпадает с теоретическими положениями [4] при отсутствии ферромагнетиков.

При асимметричном расположении шин трехфазного шинпровода относительно контура рамки в вариантах (б) и (в) проявляется зависимость величины магнитного момента от порядка чередования фаз питания. В варианте (в) различие площадей контуров, образующихся при изменении порядка чередования фаз, увеличено по сравнению с вариантом (б), т.е. степень асимметрии выше. Это привело к большему различию магнитных моментов физической модели при изменении порядка чередования фаз (соответственно 18 % и 25 %). Как и в варианте (а), в вариантах (б) и (в) зависимости магнитного момента от тока шинпровода носят линейный характер.

Эффект зависимости величины магнитного момента от порядка чередования фаз зафиксирован экспериментально для физической модели при отсутствии ферромагнитных материалов. Поскольку при этих условиях нет магнитной анизотропии, результаты эксперимента позволяют утверждать, что в трехфазном электрооборудовании причиной зависимости магнитного момента от порядка чередования фаз является асимметричное расположение шинпроводов и токопроводов относительно.

В случае, когда конструкция токопроводящих элементов электрооборудования выполнена симметричной относительно пассивных элементов его конструкции (электропроводящих и ферромагнитных), магнитофазный эффект не проявляется. Такой способ может быть рекомендован для обеспечения электромагнитной совместимости силового электрооборудования в части магнитного поля частоты сети.



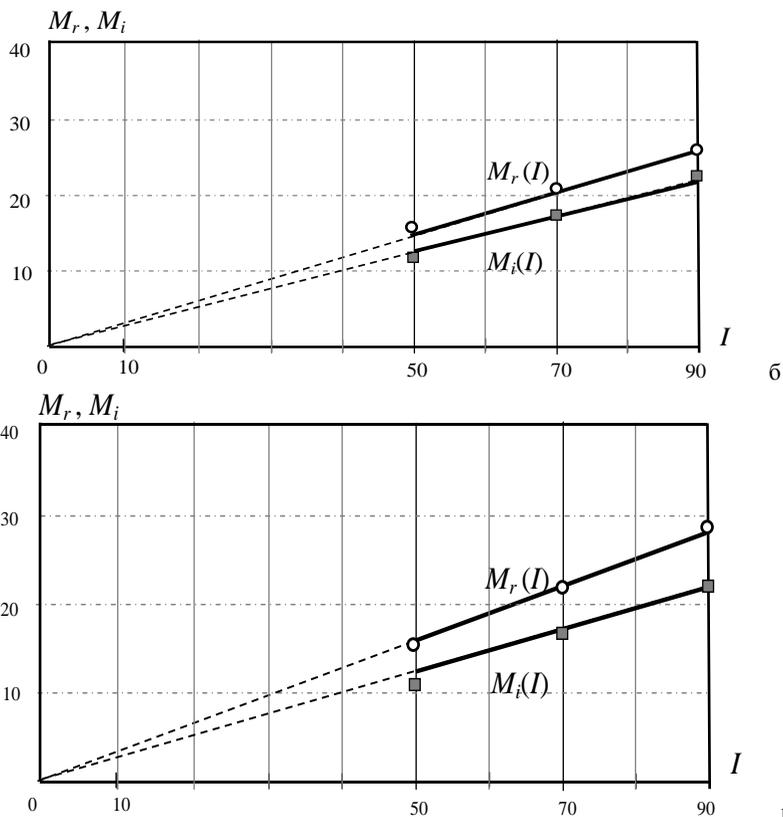


Рис. 5

Заключение. 1. Экспериментально подтвержден магнитофазный эффект влияния порядка чередования фаз на переменный магнитный момент трехфазного электрооборудования. Наряду с известным фактором – магнитной анизотропией ферромагнитных материалов, теоретически и экспериментально установлено влияние геометрической асимметрии расположения активных источников магнитного поля – шинпроводов и токопроводов, относительно пассивных источников – рамочной конструкции, при наличии которой возникает зависимость магнитного момента от порядка чередования фаз питания трехфазного электрооборудования.

2. При обеспечении электромагнитной совместимости трехфазного электрооборудования в части переменного поля частоты сети необходимо учитывать наличие магнитофазного эффекта у электрооборудования, порядок чередования фаз питания которого не оговорен, либо предусмотрен

реверсивный режим работы.

3. В качестве рекомендации по уменьшению влияния магнитофазного эффекта на переменное магнитное поле предлагается симметрирование конструкции токопроводящих элементов силовой цепи электрооборудования относительно пассивных источников поля – рамы и других электропроводных элементов, электрически изолированных от токопроводов силовой цепи.

Список литературы: 1. Трехфазная асинхронная реверсивная электрическая машина: А.с. 864448 СССР, МКИ Н 02 К 17/12 / И.З. Скрыпин, В.Б. Финкельштейн. – №2788868/24-07; Заявлено 17.05.79; Опубл. 15.09.81, Бюл. № 34. – 3 с. 2. *Скрыпин И.З., Финкельштейн В.Б.* Об изменении внешнего магнитного поля электрической машины при изменении направления вращения // *Электричество*. – 1979. – №3. – С. 40-41. 3. *Розов В.Ю., Ерисов А.В., Лутиков В.С.* Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей: Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; №791. – К.: 1996. – 47 с. 4. *Клименко Б.В., Лутиков В.С., Выровец С.В., Крюкова Н.В., Гелярская О.А.* Анализ магнитного момента трехфазных цепей // *Электротехника і електромеханіка*. – 2002. – №1. – С. 28-36. 5. *Лутиков В.С., Крюкова Н.В., Гелярская О.А., Варшимова И.С.* Влияние рамочной конструкции электрооборудования на его магнитное поле // *Электромеханические преобразователи энергии: Материалы Международной наук.-техн. конф. 20-22 октября 2005 г. Томск: ТПУ, – 2005. – С. 66-69.* 6. *Крюкова Н.В., Гелярская О.А., Данько В.Г., Лутиков В.С., Серeda А.Г.* Методика определения магнитного момента рамочной конструкции электротехнического устройства // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2005. – №2. – С. 81-86. 7. Методика контроля и нормирования магнитных моментов судового оборудования МКММ-90. – ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Харьковское отделение ВНИИЭМ, 1990. – 49 с. (с приложением).

Поступила в редколлегию 03.09.08