

СПОСОБ НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Лутиков В.С., к.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ», кафедра "Электрические аппараты"

Тел. (0572) 40-08-64, E-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua.

Розглянуто структуру параметричної системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля, що створюється струмопроводами силового кола розподільчого пристрою поблизу його поверхні. Запропоновано спосіб налаштування параметрів електромагніт-компенсаторів системи за даними магнітних вимірів. Застосування такої системи дозволяє ефективно компенсувати магнітне поле до рівня, що відповідає вимогам електромагнітної сумісності.

Рассмотрена структура параметрической системы автоматической компенсации внешнего магнитного поля, создаваемого токопроводами силовой цепи распределительного устройства вблизи его поверхности. Предложен способ настройки параметров электромагнитов-компенсаторов системы по данным магнитных измерений. Применение такой системы позволяет эффективно компенсировать магнитное поле до уровня, отвечающего требованиям электромагнитной совместимости.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения требований электромагнитной совместимости [1, 2] и экологии [3] применяется компенсация внешнего магнитного поля силового электрооборудования [4]. Распределительные устройства являются типичными представителями такого электрооборудования. Среди известных методов [5, 6] наиболее эффективной является автоматическая компенсация магнитного поля с помощью систем электромагнитов-компенсаторов [7]. Такие системы известны как параметрические системы автоматической компенсации. В качестве параметров систем автоматической компенсации в распределительном устройстве выступают токи независимых контуров силовой цепи [8]. В состав системы компенсации поля распределительного устройства входят датчики тока, электромагниты-компенсаторы и устройство для формирования их токов [4]. Основные требования к таким системам формулируются исходя из необходимости компенсации поля вблизи поверхности распределительного устройства и возможности настройки параметров электромагнитов-компенсаторов по данным магнитных измерений. Такой электромагнит представляет собой цилиндрическую многovitkovую катушку с ферромагнитным сердечником либо без него, а ось катушки направлена вдоль одной из конструктивных осей шкафа распределительного устройства. Выполнение этих требований является сложной технической задачей.

Для упрощения описания структуры поля и возможности экспериментального определения параметров источников в настоящее время применяются дискретные модели поля [9, 10]. Объем распределительного устройства условно разбивается пространственной сеткой на выделенные объемы, в пределах которых расположены участки реальных шин проводов и токопроводов силовой цепи, являющихся основными источниками внешнего магнитного поля. Каждый из образовавшихся выделенных объемов рассматривается как независимый сосредоточенный источник поля. Определение его параметров при математическом моделировании проводится на основании данных о геометрии шин проводов и токопроводов и проте-

кающих в них токов с учетом режимов работы распределительного устройства [11]. При экспериментальных исследованиях параметры этих источников определяются путем решения обратной задачи магнитостатики, когда по измеренным компонентам напряженности внешнего магнитного поля и известных положениях выделенных объемов внутри пространства шкафа распределительного устройства определяются параметры источников поля. В общем случае поле каждого из полученных источников представляется полиномиальным рядом относительно расстояния между выделенным объемом и точкой измерения поля [12]. Такой характер зависимости приводит к проблеме плохой обусловленности при математической обработке данных измерений [13], что резко снижает возможности применения такой модели при большом числе источников поля.

Среди дискретных моделей следует отметить объединенную дипольную модель [14], в которой каждый из источников рассматривается как диполь, характеризующийся вектором магнитного момента. Использование объединенной дипольной модели существенно упрощает решение обратной задачи магнитостатики. Упрощение достигается за счет того, что модель поля из мультипольной становится линейной: напряженность поля в произвольной точке наблюдения рассматривается как сумма только дипольных составляющих полей смещенных диполей. Применение этой модели позволяет преодолеть математические сложности решения обратной задачи магнитостатики и перейти непосредственно к задаче компенсации внешнего магнитного поля распределительного устройства как совокупности дипольных структур – источников поля дипольного типа, расположенных в выделенных объемах шкафа. Следует также заметить, что эта модель позволяет использовать для компенсации внешнего магнитного поля вблизи поверхности электрооборудования практически весь арсенал известных средств снижения магнитного момента [5], подтвердивших на практике высокую эффективность (в предельном случае до 300 единиц) снижения уровня магнитного поля на удалении от поверхности распределительного устройства более трех габаритов [15].

Для компенсации магнитного поля вблизи поверхности распределительного устройства автором разработан метод балансировки магнитных моментов дипольных структур [16]. Задача компенсации внешнего магнитного поля вблизи поверхности распределительного устройства при этом сводится к одновременной компенсации магнитных моментов дипольных структур. Нерешенной задачей при таком методе компенсации остается настройка параметров электромагнитов-компенсаторов системы автоматической компенсации.

Целью работы является изложение способа настройки параметров электромагнитов-компенсаторов, используемых в качестве исполнительных элементов системы автоматической компенсации.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В качестве исходной информации для построения системы автоматической компенсации используется модель распределительного устройства в виде системы дипольных структур и условия его компенсации.

Каждая из дипольных структур описывается уравнением, связывающим компоненты вектора магнитных моментов с токами независимых контуров, участки которых располагаются в выделенном объеме шкафа распределительного устройства,

$$m_u^q = \sum_{k=1}^K I_k S_{ku}^q e^{j\varphi_k}, \quad (1)$$

где m_u^q – компонента вектора магнитного момента q -й дипольной структуры для соответствующего выделенного объема; I_k , φ_k – амплитуда и фаза тока k -го независимого контура силовой цепи распределительного устройства; S_{ku}^q – проекция вектора площади части k -го независимого контура силовой цепи, расположенного в q -м выделенном объеме, на направление u ; u – индекс, принимающий значения 1, 2, 3 соответственно для координатных осей x, y, z .

Необходимые и достаточные условия компенсации внешнего магнитного поля формулируются с учетом наличия точек нулевого поля вблизи поверхности распределительного устройства. Такие точки могут присутствовать в распределении поля одинаково ориентированных пар контуров [17], либо могут быть искусственно созданы. Система уравнений, описывающих эти условия, имеет вид:

$$\begin{cases} (\mathbf{m}_q) + (\mathbf{m}_q)_k + \varepsilon_m = 0; \\ \dot{\mathbf{H}}_k(r_a) + \varepsilon_H = 0; \\ (q = \overline{1, Q}), \end{cases} \quad (2)$$

где (\mathbf{m}_q) – вектор магнитного момента q -той дипольной структуры, заданный соотношением (1); $(\mathbf{m}_q)_k$ – вектор магнитного момента компенсирующего источника – электромагнита-компенсатора, размещаемого при компенсации в этом выделенном объеме; ε_m – погрешность компенсации магнитного момента; $\dot{\mathbf{H}}_k(r_a)$ – комплексный вектор напряженности поля, создаваемого электромагнитом-компенсатором в точке нулевого поля; r_a – радиус-вектор точки нулевого поля; ε_H – погрешность компенсации модуля

напряженности в точке нулевого поля; Q – число выделенных объемов распределительного устройства.

Первое из уравнений системы (2) является необходимым условием компенсации поля во всем внешнем пространстве, за исключением точек нулевого поля. На основе этого уравнения определяется структура системы автоматической компенсации поля. Второе уравнение является достаточным условием, распространяющимся и на точки нулевого поля. Это уравнение используется для настройки электромагнитов-компенсаторов и контроля компенсации поля.

Использование комплексного вектора напряженности обусловлено необходимостью учета фазы поля, создаваемого трехфазной системой токовых контуров [18], представляющих силовую цепь распределительного устройства. В общем случае система комплексных векторов напряженности может быть представлена отдельно для действительной и мнимой составляющих, создаваемых соответственно косинусными и синусными составляющими токов независимых контуров силовой цепи. В данной статье для простоты рассуждений в дальнейшем рассматривается одна из этих составляющих, так как принципиальных отличий между ними нет. При необходимости для другой составляющей поля структура системы компенсации строится аналогичным образом.

Для точной компенсации магнитного поля ($\varepsilon_m = 0$) условия компенсации получаются из системы (2) и, по сути, сводятся к компенсации каждой компоненты результирующего магнитного момента дипольной структуры с помощью электромагнита-компенсатора, ось которого ориентирована вдоль оси соответствующей компоненты:

$$\begin{aligned} \sum_k I_k S_{ku}^q + I_u^q S_u^q C_u^q &= 0; \\ k = \overline{1, K}; \quad q = \overline{1, Q}; \quad u = x, y, z, \end{aligned} \quad (3)$$

где S_{ku}^q – элемент площади k -го контура q -й дипольной структуры, соответствующий пространственному направлению u ; I_u^q , S_u^q – ток и элемент площади обмотки электромагнита-компенсатора с номером q , предназначенном для компенсации компоненты магнитного момента в направлении u ; C_u^q – коэффициент усиления магнитного момента сердечником электромагнита с номером q , равный единице при отсутствии сердечника.

Знак суммирования в соотношении (3) учитывает зависимость магнитного момента дипольной структуры от режима работы распределительного устройства, определяемого комбинацией одновременно включенных фидеров.

Переход от реальных токов независимых контуров силовой цепи I_k , $k = \overline{1, K}$ к слаботочным сигналам I'_{ek} при их обработке в системе автоматической компенсации учитывается введением сомножителя $1/p$,

$$I'_k = I_k/p, \quad (4)$$

где p – коэффициент передачи датчика тока независимого контура.

С учетом (4) из соотношения (3) получается следующее выражение тока обмотки электромагнита-компенсатора, предназначенного для компенсации

компоненты магнитного момента q -й дипольной структуры в направлении u ,

$$I_u^q = \sum_{k=1}^K I_k' \left(-p \frac{S_{ku} \beta_{ku}^q}{S_u^q C_u^q} \right) = p \sum_{k=1}^K I_{ek}' \alpha_{ku}^q \beta_{ku}^q, \quad (5)$$

где p – коэффициент передачи датчика тока, принятый одинаковым для всех датчиков; α_{ku}^q – коэффициент соотношения магнитных моментов (элементов площадей) исходной и компенсирующей дипольных структур; β_{ku}^q – коэффициент, характеризующий соотношение площадей части и целого контура с номером k для q -й дипольной структуры,

$$\alpha_{ku}^q = \left(-\frac{S_{ku}}{S_u^q C_u^q} \right); \quad \beta_{ku}^q = \frac{S_{ku}}{S_{ku}}. \quad (6)$$

В качественном отношении структура системы компенсации содержит такие же блоки, что и система компенсации магнитного момента распределительного устройства [11], а отличия связаны с количеством используемых блоков и числом регуляторов параметров системы, используемых в процессе настройки электромагнитов-компенсаторов. Максимальное число этих регуляторов N определяется числом независимых контуров силовой цепи (K), числом дипольных структур (Q) и числом компенсируемых компонент (три) их магнитных моментов и, как следует из соотношения (3), равно

$$N = 3KQ. \quad (7)$$

В действительности число этих регулировок (7) может быть уменьшено за счет того, что векторы магнитных моментов некоторых дипольных структур имеют не три, а одну либо две компоненты.

С точки зрения способа настройки достаточно ограничиться рассмотрением только тех элементов и их связей, которые отличаются функциями и обеспечивают необходимые регулировки параметров системы компенсации. Такое допущение позволяет использовать упрощенную схему системы автоматической компенсации при описании способа настройки электромагнитов-компенсаторов.

На рис. 1 приведена упрощенная схема связей блоков системы автоматической компенсации (САК) однофазного распределительного устройства, обеспечивающих формирование тока электромагнитного компенсатора, предназначенного для компенсации выбранной компоненты магнитного момента одной из дипольных структур.

Распределительное устройство РУ рассматривается как набор токовых контуров. В состав системы автоматической компенсации входят датчики токов ДТ, устройства формирования УФ и электромагниты-компенсаторы КЭ. Показанный на схеме один из независимых контуров с номером k обтекается током I_k (например, косинусной составляющей). На рис. 1 приведена модифицированная схема этого контура (М-схема), полученная из электрической схемы введением элемента площади S_{ku} контура [11]. Электрическое сопротивление контура обозначено Z_k , а с помощью ключевого элемента K_k обеспечивается включение питания контура при подключении соответствующего фидера распределительного устройства. Ток

этого контура I_k является входной величиной для датчика тока ДТ _{k} . С выхода датчика тока сигнал I_k' , уменьшенный в p раз относительно входного тока, подается на устройство формирования УФ ^{q} , обеспечивающее формирование тока электромагнитного компенсатора КЭ ^{q} .

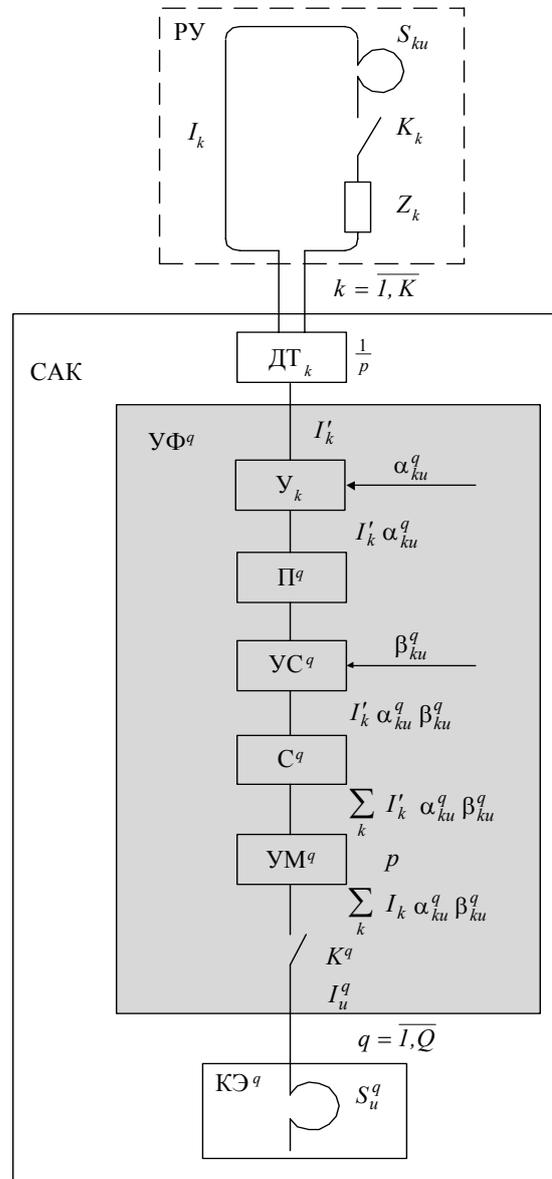


Рис. 1. Упрощенная блок-схема системы автоматической компенсации магнитного поля.

Устройство формирования УФ ^{q} содержит последовательно включенные регулируемый усилитель контурного тока U_k , переключатель полярности Π^q , усилитель тока дипольной структуры $УС^q$, сумматор $С^q$, усилитель мощности $УМ^q$ и выключатель КЭ ^{q} . Поступающий с выхода датчика тока на вход усилителя U_k сигнал изменяется пропорционально на величину коэффициента его усиления α_{ku}^q (6). Переключателем полярности Π^q обеспечивается выбор полярности сформированного сигнала $I_k' \alpha_{ku}^q$. Усилителем тока дипольной структуры $УС^q$ с регулируемым коэффициентом усиления β_{ku}^q формируется сигнал вида

$I'_k \alpha_{ku}^q \beta_{ku}^q$. В результате суммирования аналогичных сигналов в сумматоре S^q на выходе формируется сигнал $\sum_{k=1}^K I'_k \alpha_{ku}^q \beta_{ku}^q$, который после усиления в p раз в

усилителе мощности УМ^q равен $p \sum_{k=1}^K I'_k \alpha_{ku}^q \beta_{ku}^q = I_u^q$ и

его структура полностью соответствует структуре тока компенсации, входящего в соотношения (5). Сформированный ток I_u^q подается в обмотку электромагнита-компенсатора КЭ^q, представленного на схеме элементом площади S_u^q . Число компенсационных электромагнитов, ориентированных вдоль каждой из трех ортогональных осей, в общем случае равно числу дипольных структур Q . Управление подачей питания на электромагнит-компенсатор при настройке обеспечивается выключателем K_u^q .

Если положить коэффициент $\beta_{ku}^q = 1$, то полученная структура тока компенсации полностью совпадает со структурой тока при компенсации магнитного момента распределительного устройства [11]. Это свойство используется при настройке системы компенсации.

СПОСОБ НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ

При описании способа настройки предполагается, что все усилители мощности имеют одинаковые коэффициенты передачи, считается известным положение точки (точек) нулевого поля [19] и определены величины компонент магнитных моментов всех дипольных структур в результате решения обратной задачи магнитостатики. Для обеспечения независимой настройки электромагнитов-компенсаторов используется свойство точки нулевого поля. Оно заключается в том, что при внесении дополнительного источника поля (например, при включении настраиваемого электромагнита-компенсатора) в состав работающего распределительного устройства поле в этой точке создается исключительно этим источником, и напряженность поля пропорциональна магнитному моменту источника.

Настройка системы компенсации производится в два этапа. На первом этапе обеспечивается регулировка усилителей контурных токов и выбор полярности переключателей, на втором – регулировка усилителей токов дипольных структур.

Первый этап включает:

- выбор и подключение настраиваемой обмотки электромагнита-компенсатора;
- установку коэффициента усилителя мощности требуемой величины (равной p);
- поочередное подключение одного из независимых контуров силовой цепи распределительного устройства;
- измерение соответствующей компоненты магнитного момента (m_u) распределительного устройства;
- регулировку коэффициента усиления α_{ku}^q уси-

лителя контурного тока при подключенном k -ом независимом контуре исходя из условия компенсации измеряемой компоненты магнитного момента.

Настройка считается выполненной, если величина регистрируемой в результате измерений компоненты магнитного момента равна нулю в пределах требуемой точности настройки.

В результате выполнения операций этого этапа настройки устанавливаются величины коэффициентов передачи всех усилителей контурных токов и положения переключателей полярности, чем обеспечивается идентичность временных структур токов системы автоматической компенсации (по всем режимам работы распределительного устройства). С помощью усилителей мощности обеспечивается согласование уровней обрабатываемых в устройстве формирования сигналов до уровней, отвечающих реальным токам контуров силовой цепи распределительного устройства.

Второй этап включает:

- установку измерительного датчика магнитного поля в точку нулевого поля;
- поочередное подключение одного из K независимых контуров силовой цепи распределительного устройства;
- поочередное подключение настраиваемой обмотки компенсационного электромагнита КЭ^q;
- измерение в точке нулевого поля компоненты напряженности магнитного поля, соответствующей ориентации настраиваемой обмотки электромагнита-компенсатора КЭ^q;
- регулировку коэффициента передачи β_{ku}^q усилителя тока дипольной структуры УС^q для каждого из K независимых контуров силовой цепи распределительного устройства в зависимости от требуемого значения компоненты магнитного момента дипольной структуры. При регулировке этих коэффициентов в качестве исходных данных выступают значения компонент магнитных моментов дипольных структур.

Настройка считается выполненной, если регулируемая величина компоненты магнитного момента равна расчетной величине. В результате выполнения операций второго этапа настройки устанавливаются величины коэффициентов передачи для всех усилителей токов дипольных структур системы автоматической компенсации.

По завершении настройки системы автоматической компенсации проводится контроль компенсации компонент результирующего магнитного момента для каждого независимого контура силовой цепи (режима работы) и контроль компенсации напряженности магнитного поля в точках нулевого поля для соответствующих режимов работы распределительного устройства и, при необходимости, в выборочных точках контрольной поверхности.

При изменении режима работы распределительного устройства изменяются токи его независимых контуров и адекватно им изменяются токи исполнительных элементов, чем обеспечивается автоматическая компенсация внешнего магнитного поля как вблизи, так и на удалении от его поверхности.

Эффективность компенсации внешнего магнитного поля с помощью предложенной системы ограни-

чена тремя составляющими: погрешностью определения величин магнитных моментов дипольных структур при решении обратной задачи магнитостатики, погрешностью датчиков поля и погрешностью регулировки параметров электромагнитов-компенсаторов. Количественная оценка двух последних составляющих приведена в работе [15] и в пределе не превышает 0,0034. Погрешность первой составляющей, как показывают расчеты, может быть снижена до величин такого же порядка (0,001-0,002). В этой связи ожидаемая эффективность компенсации внешнего магнитного поля составляет гарантированно 100 единиц, что в большинстве случаев достаточно для обеспечения требований электромагнитной совместимости для распределительных устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе представления распределительного устройства в виде системы дипольных структур – выделенных объемов, каждый из которых характеризуется вектором дипольного магнитного момента, и их зависимости от токов независимых контуров силовой цепи получена структура параметрической системы автоматической компенсации внешнего магнитного поля распределительного устройства. В качественном отношении эта структура содержит такие же блоки, что и система компенсации магнитного момента распределительного устройства: датчики токов независимых контуров, устройства формирования и электромагниты компенсаторы. Отличия связаны с увеличением количества блоков и числа регуляторов параметров системы, используемых в процессе настройки электромагнитов-компенсаторов.

2. Предложен способ настройки параметров электромагнитов-компенсаторов в два этапа: по данным измерений магнитного момента распределительного устройства и напряженности поля в точке нулевого поля. На первом этапе настройки обеспечивается согласование временных структур токов системы автоматической компенсации с учетом режимов работы распределительного устройства, определяемых сочетанием одновременно включенных фидеров. На втором этапе производится поочередная балансировка магнитных моментов электромагнита-компенсатора и дипольной структуры. Достоинством способа является независимость и высокая точность настройки каждого из электромагнитов-компенсаторов.

3. Применение такого способа настройки параметрической системы автоматической компенсации позволяет эффективно компенсировать внешнее магнитное поле распределительного устройства до уровня, отвечающего требованиям электромагнитной совместимости.

ЛИТЕРАТУРА

- [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] ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. - Введ. 01.07.93. - М.: Изд-во стандартов, 1993.
- [3] Крыжов Г.П., Кравченко О.А. Как защититься от вредного воздействия электромагнитного поля (допустимые нормы напряженности поля, ограничения на время пребывания в поле без защитных средств) // Электропанорама. - № 11. – 2002. – С. 40-42.
- [4] Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. – Киев: 1995. – 42 с. – (Препр./НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 772).
- [5] Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей / Розов В.Ю., Ерисов А.В., Луников В.С. – Киев, 1996. – 47 с. – (Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 791).
- [6] Луников В.С. Повышение эффективности методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Технічна електродинаміка. – 2000. - №1. – С. 7-13.
- [7] Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Техн. електродинаміка. – 1996. - № 1. - С. 3-9.
- [8] Клименко Б.В., Луников В.С. Структура внешнего магнитного поля вблизи поверхности распределительного устройства // Вестник Харьк. госуд. политехн. ун-та. Сб. науч. тр. Вып. 65. – Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 47-53.
- [9] Клименко Б.В., Луников В.С., Выровец С.В. и др. Анализ моделей магнитного поля электрооборудования, используемых при обеспечении электромагнитной совместимости // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. - № 1. – С. 41-48.
- [10] Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.
- [11] Луников В.С. Структурный анализ магнитного момента тока электрических цепей // Технічна електродинаміка. - 1999. - № 4. - С. 9-16.
- [12] Яновский Б.М. Земной магнетизм. Т.1.–Л.: ЛГУ, 1964.–445 с.
- [13] Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
- [14] Луников В.С. Теоретическое обоснование объединенной дипольной модели внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. праць. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. - № 17. – С. 95-102.
- [15] Розов В.Ю. Анализ эффективности параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. - 2002. - № 2. - С. 3-10.
- [16] Луников В.С. Метод балансировки магнитных моментов при компенсации внешнего магнитного поля распределительных устройств // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. - № 3. – С. 47-54.
- [17] Луников В.С. Компенсация магнитного поля при наличии магнитных аномалий вблизи поверхности распределительных устройств // Технічна електродинаміка. - 2000. - № 6. - С. 18-24.
- [18] Клименко Б.В., Луников В.С., Выровец С.В. и др. Анализ магнитного момента трехфазных цепей // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. - № 1. – С. 28-36.
- [19] Клименко Б.В., Луников В.С., Емельянов В.Л. и др. Алгоритм определения положения точек магнитных аномалий вблизи поверхности распределительного устройства // Вісник НТУ "ХПІ". – 2001. - № 16. – С. 87-92.

Поступила 07.03.03