

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3.07

Гаврилов С.А.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Кимстач О.Ю.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Новогрецкий С.Н.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Подымака В.И.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Прудников А.А.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

РЕАКТОР ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА С ИЗМЕНЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ВЗАИМОИНДУКЦИИ МЕЖДУ ОБМОТКАМИ

Рассмотрен реактор трансформаторного типа, в котором регулирование тока в первичной обмотке осуществляется посредством уменьшения коэффициента взаимоиנדукции между отдельными частями вторичной обмотки. Анализ электрической схемы замещения реактора показал возможность регулирования тока первичной обмотки с кратностью, равной пяти. Предложена конструкция реактора с аксиальным симметричным трехстержневым магнитопроводом, в котором части вторичных обмоток электрически соединены последовательно, замкнуты накоротко и отделены друг от друга в пространстве магнитным шунтом, регулируемым поперечным подмагничиванием. Рассмотрена схема замещения магнитной цепи реактора предложенной конструкции. Показано, что намагничивающая сила первичной обмотки прямо пропорционально зависит от магнитного сопротивления шунта.

Ключевые слова: реактор, намагничивающая сила, магнитный шунт, поперечное подмагничивание, кратность регулирования.

Постановка проблемы. В энергосистемах находят применение шунтирующие реакторы для компенсации зарядной мощности линий [1, с. 10], реакторы в составе фильтров для подавления высших гармоник, реакторы для регулирования емкостной мощности конденсаторных батарей с целью емкостного возбуждения и стабилизации напряжения асинхронных генераторов [2, с. 43]. При изменении режимов работы и конфигурации энергосистемы соответствующим образом должны меняться и индуктивные сопротивления реакторов.

Анализ последних исследований и публикаций. Известными способами регулирования реактора является продольное или поперечное подмагничивание его магнитной системы, что приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, как

следствие, к уменьшению индуктивного сопротивления [3, с. 18; 4, с. 29]. Для осуществления продольного подмагничивания стержень магнитопровода реактора делится на две равные секции, которые подмагничиваются постоянным током в противоположных направлениях, что исключает наличие в суммарной намагничивающей силе обмотки переменного тока четных гармоник [5, с. 1; 6, с. 6]. Также известны конструкции аксиального симметричного реактора с подмагничиванием противоположно расположенных ярем в одном направлении, а также радиального симметричного шестистержневого реактора с расположением обмоток на трех стержнях и подмагничиванием ярем в одном направлении по окружности. Указанные конструкции позволяют скомпенсировать четные гармоники в токе обмотки, однако

секционирование стержней и удвоение системы подмагничивания обмотками встречного включения значительно увеличивает массу активных материалов, а наличие прямой индуктивной связи между основной обмоткой и обмотками управления приводит к повышению инерционности регулирования. Отмеченные недостатки отсутствуют в конструкциях с поперечным подмагничиванием [7, с. 71; 8, с. 2]. Известны конструкции трехфазных индукционных статических преобразователей и аппаратов с аксиальными симметричными магнитопроводами, в которых осуществляется поперечное подмагничивание стержней [8, с. 2; 9, с. 33]. Для уменьшения массогабаритных показателей предложено стержни конструктивно разделять на две симметричные секции с отверстиями для установки обмотки подмагничивания. Однако при этом увеличивается длина среднего витка и материалоемкость основной обмотки, охватывающей стержень. Также известна радиальная симметричная конструкция индукционного статического преобразователя, которая состоит из трех одинаковых витых секций [7, с. 74]. Фазы основной трехфазной обмотки охватывают смежные участки – стержни витого магнитопровода. Обмотка подмагничивания располагается на индукторе, который, имея вид скобы, охватывает внешнюю часть магнитопровода и замыкает магнитный поток подмагничивания в поперечном направлении по отношению к магнитному потоку основной обмотки. Однако в этом случае тоже не удастся значительно уменьшить массогабаритные показатели в связи с применением массивных скоб, охватывающих магнитопровод секций. Поэтому представляют интерес реакторы трансформаторного типа [10, с. 5], в которых каждая фаза содержит замкнутый магнитопровод с зазорами в стержне и три обмотки (сетевую (первичную), обмотку управления (вторичную), замкнутую тиристорным блоком, и компенсационную обмотку, предназначенную для компенсации третьей гармоники в токе реактора путем соединения обмоток трех фаз в треугольник). Значительным недостатком подобной конструкции считаем наличие тиристорного блока, который предполагает возникновение дополнительных высших гармоник в токе реактора.

Постановка задания. Целью работы является анализ особенностей конструктивной реализации реактора трансформаторного типа с симметричной конструкцией магнитопровода при регулировании тока электромагнитным путем за счет уменьшения коэффициента взаимной индукции между отдельными частями вторичной обмотки.

Изложение основного материала исследования. Рассмотрим возможность использования статического индукционного преобразователя трансформаторного типа для регулирования реактивной мощности индуктивного характера.

В общем случае такой преобразователь состоит из первичной и вторичной обмоток, расположенных на одном сердечнике, а также дополнительной вторичной обмотки, отделенной от основных обмоток магнитным шунтом. Дополнительная и основная вторичные обмотки соединяются последовательно и замыкаются накоротко. При увеличении магнитного сопротивления шунта (например, путем подмагничивания) соответствующим образом меняется и реактивное сопротивление трансреактора за счет увеличения потоков рассеяния и уменьшения коэффициента взаимной индукции между обмотками. Таким образом, получаем регулируемый источник реактивной мощности.

Для анализа в первом приближении электрических свойств конструкции примем следующие положения:

- а) активные сопротивления обмоток считаем пренебрежительно малыми в сравнении с индуктивными и принимаем их равными нулю;
- б) коэффициент взаимной индукции между основными обмотками считаем величиной постоянной и не зависящей от магнитного состояния шунта;
- в) коэффициенты взаимных индукций между дополнительной обмоткой и основными обмотками зависят только от магнитного сопротивления шунта;
- г) полные индуктивные сопротивления обмоток при изменении магнитного сопротивления шунта остаются постоянными.

Тогда для схемы замещения, представленной на рис. 1, можно записать следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega(M_{12} - M_{13}) \dot{I}_2; \\ 0 &= j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega L_3 \dot{I}_2 - 2j\omega M_{23} \dot{I}_2 - j\omega(M_{12} - M_{13}) \dot{I}_1, \end{aligned} \right\}$$

где L_1, L_2, L_3 – полные индуктивности основной первичной, основной и дополнительной вторичных обмоток соответственно; M_{12}, M_{13}, M_{22} – взаимные индуктивности обмоток; I_1, I_2 – токи в

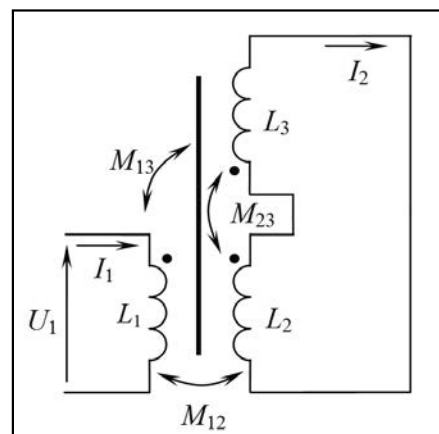


Рис. 1. Схема замещения трансреактора

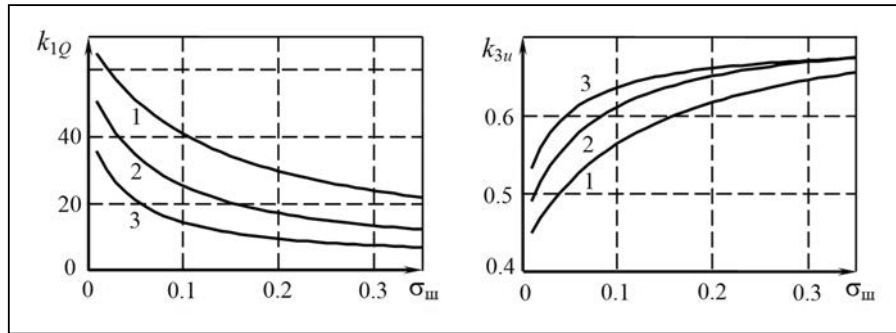


Рис. 2. Зависимость безразмерных коэффициентов изменения реактивной мощности k_{1Q} и напряжения на дополнительной вторичной обмотке k_{3u} от коэффициента рассеяния $\sigma_{ш}$ (1 – $x = 0,2$; 2 – $x = 0,25$; 3 – $x = 0,3$)

первичной и вторичной обмотках соответственно; U_1 – фазное напряжение на первичной обмотке; $\omega = 2\pi f$; f – частота напряжения.

Решим систему уравнений относительно токов:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1} k_{1i}; k_{1i} = \frac{1}{1 - \frac{(M_{12} - M_{13})^2}{(L_2 + L_3 - 2M_{23}) L_1}};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1} k_{2i}; k_{2i} = \frac{(M_{12} - M_{13})}{(L_2 + L_3 - 2M_{23}) - \frac{(M_{12} - M_{13})^2}{L_1}},$$

где k_{1i} и k_{2i} – безразмерные коэффициенты изменения токов в первичной и вторичной цепях соответственно.

Тогда реактивная мощность установки и напряжение на дополнительной вторичной обмотке определяется так:

$$Q_1 = \frac{3j\dot{U}_1^2}{\omega L_1} k_{1Q}; k_{1Q} = k_{1i} = \frac{1}{1 - \frac{(M_{12} - M_{13})^2}{(L_2 + L_3 - 2M_{23}) L_1}}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\omega L_1} k_{2i} (\omega L_3 - \omega M_{23}) + \frac{\dot{U}_1}{\omega L_1} k_{1i} \omega M_{13} = \dot{U}_1 k_{3u};$$

$$k_{3u} = k_{2i} \frac{(L_3 - M_{23})}{L_1} + k_{1i} \frac{M_{13}}{L_1},$$

где k_{1Q} и k_{3u} – безразмерные коэффициенты изменения реактивной мощности, потребляемой из сети, и изменения напряжения на дополнительной вторичной обмотке.

Введем следующие обозначения:

$$L_1 = L_{2\Sigma} (w_1/w_{2\Sigma})^2 = L_{2\Sigma} k_{тп}^2; L_3 = L_{2\Sigma} \cdot x^2;$$

$$L_2 = L_{2\Sigma} \cdot (1-x)^2;$$

$$M_{12} = \sqrt{(1-\sigma_{12})L_1L_2} = \sqrt{(1-\sigma_{12})L_1L_{2\Sigma}} \cdot (1-x);$$

$$M_{13} = \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{ш})L_1L_3} = \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{ш})L_1L_{2\Sigma}} \cdot x;$$

$$M_{23} = \sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{ш})L_2L_3} = \sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{ш})L_{2\Sigma}} \cdot x(1-x),$$

где w_1 и $w_{2\Sigma}$ – количество витков в первичной и суммарно во вторичных обмотках соответ-

ственно; $k_{тп}$ – коэффициент трансформации без учета влияния магнитного шунта; $L_{2\Sigma}$ – суммарная индуктивность основной и дополнительной вторичных обмоток при отсутствии шунта; x – соотношение витков дополнительной вторичной обмотки и суммарных витков вторичных обмоток; σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} – коэффициенты электромагнитного рассеяния между соответствующими парами обмоток при отсутствии шунта; $\sigma_{ш}$ – коэффициент электромагнитного рассеяния, обусловленный действием магнитного шунта.

Исходя из представленных выражений, напряжение на дополнительной вторичной обмотке, как и реактивная мощность, потребляемая из сети, являются функциями двух переменных (соотношения витков x и коэффициента рассеяния $\sigma_{ш}$):

$$k_{1Q} = k_{1i} = \frac{1}{1 - \frac{(\sqrt{(1-\sigma_{12})} \cdot (1-x) - \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{ш})} \cdot x)^2}{((1-x)^2 + x^2 - 2\sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{ш})} \cdot x(1-x))}}; \quad (2)$$

$$k_{2i} = \frac{(\sqrt{(1-\sigma_{12})} \cdot (1-x) - \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{ш})} \cdot x) k_{тп}}{\left(\frac{((1-x)^2 + x^2 - 2\sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{ш})} \cdot x(1-x))}{-(\sqrt{(1-\sigma_{12})} \cdot (1-x) - \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{ш})} \cdot x)^2} \right)};$$

$$k_{3u} = k_{2i} \frac{(x^2 - \sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{ш})} \cdot x(1-x))}{k_{тп}^2} + k_{1i} \frac{\sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{ш})} \cdot x}{k_{тп}}. \quad (3)$$

Для проведения численного анализа примем следующие параметры: $\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0,01$; $k_{тп} = 1$. Графики зависимостей, рассчитанных по формулам (2) и (3), представлены на рис. 2.

Из формулы (1) видно, что для определения потребляемой реактивной мощности коэффициент k_{1Q} умножается на реактивную мощность, которую потребляет трансреактор в режиме холостого хода, то есть при разомкнутой вторичной цепи. Для трансформаторов ток холостого хода (а значит, и с достаточной степенью

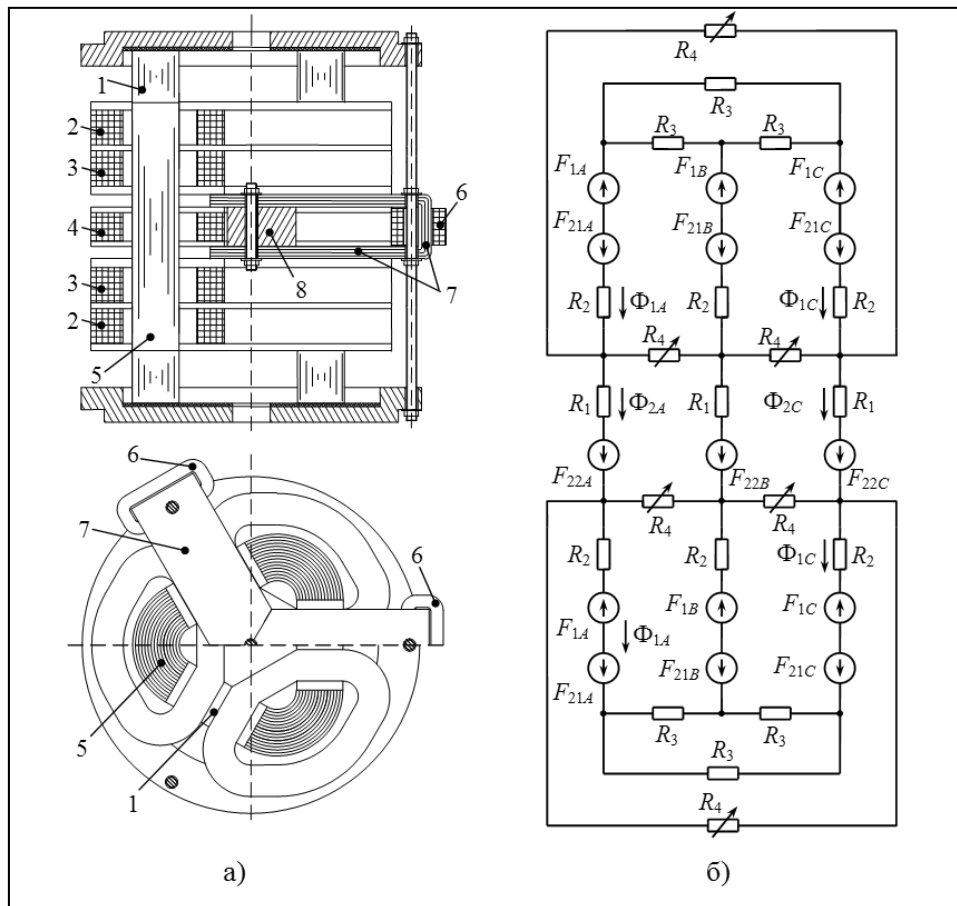


Рис. 3. Конструкція трьохфазного трансреактора (а), управляемого подмагничиванием, и схема замещения его магнитной цепи (б)

точности – потребляемая реактивная мощность) обычно составляет 1,5...4,5% от номинального значения. Таким образом, предельное значение коэффициента $k_{1Q} = 66...22,5$. Из рис. 3 видно, что при $x = 0,2$ параметр k_{1Q} изменяется в границах 22...65, а при $x = 0,3$ – в границах 7...36, то есть кратность регулирования составляет 3...5 раз, что является удовлетворительным для задач регулирования реактивной мощности. Если же предусмотреть возможность ступенчатого изменения количества витков вторичной дополнительной обмотки, кратность регулирования можно увеличить и до 10.

На рис. 3 (а) представлена возможная аксиальная конструкция подобного трехфазного трансреактора, который состоит из двух ярем (1), между которыми располагаются три стержня (5). На каждом стержне находятся две части основной первичной обмотки (3), две части основной вторичной обмотки (2) и дополнительная вторичная обмотка (4), которая в обмоточном окне охвачена скобообразным магнитным шунтом (7), совмещенным с индуктором. Обмотки подмаг-

ничивания (б) всех трех фаз предполагается соединять последовательно и питать от источника постоянного тока. Для замыкания магнитного потока подмагничивания используется призма (8) из ферромагнитного материала. Во избежание протекания тока в обмотке подмагничивания от высших гармоник, кратных трем, можно разместить компенсационные обмотки на индукторах шунтов, замкнутые в треугольник. Основные и дополнительная вторичные обмотки соединяются последовательно и замыкаются накоротко. При отсутствии подмагничивания дополнительную вторичную обмотку будет пронизывать лишь незначительная часть магнитного потока первичной обмотки, большая часть которого будет ответвляться в шунт. В результате ток в первичной обмотке будет минимальный. При увеличении тока подмагничивания магнитное сопротивление шунта будет увеличиваться, что приведет к возрастанию части магнитного потока, пронизывающей дополнительную вторичную обмотку, а значит, и к увеличению тока первичной обмотки реактора.

Рассмотрим схему замещения магнитной цепи данного трансреактора (рис. 3б). Здесь приняты следующие обозначения: R_1 – магнитное сопротивление участка стержня, на котором находится дополнительная вторичная обмотка; R_2 – магнитное сопротивление участка стержня, на котором находится половина основных обмоток; R_3 – магнитное сопротивление участка ярма между двумя соседними стержнями; R_4 – магнитное сопротивление шунта; F_{1A} , F_{1B} , F_{1C} – намагничивающие силы первичных обмоток; F_{21A} , F_{21B} , F_{21C} – намагничивающие силы основных вторичных обмоток; F_{22A} , F_{22B} , F_{22C} – намагничивающие силы дополнительных вторичных обмоток; Φ_{1A} , Φ_{1C} – магнитные потоки в стержнях первичных обмоток; Φ_{2A} , Φ_{2C} – магнитные потоки в стержнях дополнительных вторичных обмоток.

Полагая, что намагничивающие силы разных фаз образуют трехфазные симметричные системы ($F_{xyA} + F_{xyB} + F_{xyC} = 0$), можно легко получить следующие соотношения:

$$\Phi_{2A} = \frac{2/3 R_4 \Phi_{1A} + F_{22A}}{2/3 R_4 + R_1}; \quad (4)$$

$$F_{1A} = F_{21A} + \frac{\Phi_{2A} R_4 - \Phi_{1A} (3 R_2 + R_3 + R_4)}{3} \quad (5)$$

Заданным параметром изначально можно считать магнитный поток Φ_{1A} , так как он определяется поданным напряжением на первичную обмотку. Магнитный поток Φ_{2A} можно выразить через поток Φ_{1A} , если пренебречь активным сопротивлением вторичных обмоток и предположить, что установившийся режим в первом приближении наступит при взаимной компенсации электродвижущих сил, которые будут наводиться в основной и дополнительной вторичных обмотках:

$$(1-x)\Phi_{1A} = x\Phi_{2A}; \quad \Phi_{2A} = (1-x)\Phi_{1A}/x \quad (6)$$

Так как через основную и дополнительную вторичные обмотки протекает один и тот же ток, соотношение их намагничивающих сил можно также выразить через соотношение количества витков в них:

$$F_{21A}/F_{22A} = -(1-x)/(2x) \quad (7)$$

Знак «минус» в формуле 7 вытекает из встречного включения основных и дополнительной вторичных обмоток, в то время как F_{22A} и F_{21A} на рис. 3 направлены согласно.

Совместно решая уравнения 4–7, можно выразить намагничивающие силы F_{22A} и F_{1A} через магнитный поток Φ_{1A} :

$$F_{22A} = \Phi_{1A} \left[R_4 \frac{2(1-2x)}{3x} + R_1 \frac{1-x}{3x} \right];$$

$$F_{1A} = -\Phi_{1A} \left[R_4 \frac{(1-2x)^2}{3x^2} + R_1 \frac{(1-x)^2}{2x^2} + \frac{3R_2 + R_3}{3} \right].$$

Как можно видеть из полученных зависимостей, F_{1A} изменяется пропорционально магнитному сопротивлению шунта R_4 и имеет сложную зависимость от параметра x . При изменении x в пределах от 0 до 0,5 множитель при R_4 изменяется от ∞ до 0. Дальнейшее увеличение параметра x от 0,5 до 1 приводит к незначительному монотонному росту множителя, максимальное значение которого в указанном диапазоне равно 0,33. Это же значение множителя достигается при $x = 0,33$, из чего можно сделать вывод о нецелесообразности применения параметра x более 0,33.

Очевидно, что полученные зависимости подтверждают возможность регулирования реактивной мощности реактора предложенной конструкции путем изменения сопротивления магнитного шунта R_4 поперечным подмагничиванием. Однако в связи с учетом потоков рассеяния обмоток и их активных сопротивлений, а также нелинейности сопротивления R_4 , реальные соотношения рассмотренных параметров будут иметь несколько иные количественные показатели, хоть и сохраняют качественную картину.

Выводы. 1. Предложена концепция управляемого реактора трансформаторного типа, в котором изменяется реактивная мощность за счет изменения коэффициента взаимной индукции между основными и дополнительной вторичными обмотками. При этом основная и дополнительная вторичные обмотки соединяются последовательно и замыкаются накоротко. 2. Анализ упрощенной электрической схемы замещения позволил получить зависимость тока реактора от коэффициента электромагнитного рассеивания между дополнительной вторичной обмоткой и основными обмотками, обусловленную действием магнитного шунта. Показана возможность регулирования с кратностью до 5 единиц. 3. Предложена конструкция трехфазного реактора с аксиальным симметричным трехстержневым магнитопроводом, в котором основные обмотки разделены на две части и располагаются по краям стержня, а дополнительная вторичная обмотка располагается посередине стержня и отделяется от основных обмоток магнитным шунтом, который подмагничивается в поперечном направлении. 4. Анализ схемы замещения магнитной цепи реактора предложенной конструкции позволил получить зависимость тока первичной обмотки реактора от магнитного сопротивления шунта и от параметра x (доли витков дополнительной в общей вторичной обмотке). 5. Показано, что целесообразно параметр x принимать в диапазоне 0,2...0,3 единицы.

Список литературы:

1. Дмитриев М.В., Карпов А.С., Шескин Е.Б., Долгополов А.Г., Кондратенко Д.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы; под ред. Г.А. Евдокунина. СПб.: Родная Ладога, 2013. 280 с.
2. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. 88 с.
3. Соколов С.Е., Долгополов А.Г. Управляемые реакторы. Обзор технологий. Информационно-справочное издание «Новости электротехники». СПб, 2012. Вып. 3 (75). С. 18–22.
4. Цыганов С.И., Кондратенко Д.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы как средство повышения эффективности работы электроэнергетических систем. ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. М.: Электрозавод, 2008. № 1. С. 28–32.
5. Электричний реактор з підмагнічуванням: пат. 104244 Україна: МПК H01F 27/26, H01F 29/14. № а201213911; заявл. 18.02.2011 г.; опубл. 10.01.2014 г., Бюл. № 1. 9 с.
6. Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы. Сборник статей / Под редакцией докт. техн. наук, профессора А.М. Брянцева. М.: Знак, 2010. 288 с.
7. Ставинский А.А., Новогрецкий С.М., Прудников А.А. Трехфазный реактор с радиальным магнитопроводом, управляемый поперечным подмагничиванием ярма. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук, КрНУ, 2016. Вып. 2/2016 (34). С. 71–77.
8. Электромагнитная система с регулированием подмагничивания: пат. 70866 Украина: МПК H01F 29/00. № 20031213110; заявл. 30.12.2003 г.; опубл. 15.10.2004 г., Бюл. № 10. 3 с.
9. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Платирь О.О. Способы обеспечения специальных требований к силовому электрооборудованию на основе трансформаторов и трансформаторных преобразователей с пространственной структурой активной части. Электротехника і електромеханіка. Харків: НТУ ХПІ, 2005. Вып. 4. С. 30–36.
10. Александров Г.Н., Лунин В.П. Управляемые реакторы. СПб.: Третье издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005. 200 с.

**РЕАКТОР ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПУ
ЗІ ЗМІНОЮ КОЕФІЦІЄНТА ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ МІЖ ОБМОТКАМИ**

Розглянуто реактор трансформаторного типу, у якому регулювання струму в первинній обмотці здійснюється за допомогою зменшення коефіцієнта взаємодукації між окремими частинами вторинної обмотки. Аналіз електричної схеми заміщення реактора показав можливість регулювання струму первинної обмотки з кратністю, що дорівнює п'яти. Запропонована конструкція реактора з аксіальним симетричним тристрижневим магнітопроводом, у якому частини вторинних обмоток електрично з'єднані послідовно, замкнуті накоротко й відокремлені одна від одної в просторі магнітним шунтом, що регулюється поперечним підмагнічуванням. Розглянуто схему заміщення магнітного кола реактора запропонованої конструкції. Показано, що намагнічуюча сила первинної обмотки прямо пропорційно залежить від магнітного опору шунта.

Ключові слова: реактор, намагнічуюча сила, магнітний шунт, поперечне підмагнічування, кратність регулювання.

**THE TRANSFORMER TYPE REACTOR
WITH CHANGING MUTUAL INDUCTION COEFFICIENT BETWEEN WINDINGS**

The transformer type reactor in which the primary winding current regulation is carried out by reducing the mutual induction coefficient between the individual parts of the secondary winding is considered. The analysis of the reactor electrical equivalent scheme showed the regulating possibility of the primary winding current with a multiplicity of five. The reactor design with an axial symmetrical three-limb core with the secondary windings parts electrically connected in series, short-circuited and separated from each other by a magnetic shunt controlled by transverse bias is proposed. The equivalent scheme of the proposed construction reactor magnetic circuit is considered. It is shown that the primary winding magnetizing force is proportional to the shunt magnetic resistance.

Key words: reactor, magnetizing force, magnetic shunt, transverse bias, regulation multiplicity.