

УДК 621.313

ТРЕХФАЗНЫЙ РЕАКТОР С РАДИАЛЬНЫМ СИММЕТРИЧНЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ УПРАВЛЯЕМЫЙ ПОПЕРЕЧНЫМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ЯРМА

А. А. Ставинский, С. Н. Новогрецкий, А. А. Прудников

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
просп. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, 54025, Украина. E-mail: ngrek2011@gmail.com

Наиболее эффективно регулирование индуктивности реактора выполняется подмагничиванием магнитопровода. Предложена радиальная магнитная система с поперечным подмагничиванием участков ярем. Рассмотрена схема замещения магнитной системы и произведен расчет гармонического состава магнитодвижущей силы основной обмотки в зависимости от интенсивности поперечного постоянного поля подмагничивания. Эффективность регулирования увеличивается при повышении индукции магнитного поля, создаваемого основной обмоткой, уменьшении стыкового зазора в магнитопроводе и относительной длины неподмагничиваемого участка магнитопровода. При этом усиление указанных факторов вызывает увеличение процентного содержания высших нечетных гармоник в токе основной обмотки. Рассмотрена возможность подавления высших гармоник магнитодвижущей силы основной обмотки путем поперечного подмагничивания ярма переменным магнитным полем, при котором модуль результирующего вектора магнитной индукции в подмагничиваемом участке магнитопровода неизменен во времени. На основе проведенных расчетов гармонического состава показано, что наложение в поперечной оси постоянного магнитного поля и косинусоидального поля двойной частоты позволяет значительно уменьшить процентное содержание высших гармоник в токе основной обмотки.

Ключевые слова: реактор, поперечное подмагничивание, гармонический состав, намагничивающая сила.

ТРИФАЗНИЙ РЕАКТОР ІЗ РАДІАЛЬНИМ СИМЕТРИЧНИМ МАГНІТОПРОДОМ КЕРОВАНИЙ ПОПЕРЕЧНИМ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ЯРМА

А. А. Ставинський, С. М. Новогрецький, А. О. Прудников

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна. E-mail: ngrek2011@gmail.com

Найбільш ефективно регулювання індуктивності реактора виконується підмагнічуванням магнітопроводу. Запропоновано радіальну магнітну систему з поперечним підмагнічуванням ділянок ярем. Розглянуто схему заміщення магнітної системи й зроблений розрахунок гармонічного складу магніторушійної сили основної обмотки залежно від інтенсивності поперечного постійного поля підмагнічування. Ефективність регулювання збільшується при підвищенні індукції магнітного поля, створюваного основною обмоткою, зменшенні стыкового зазору в магнітопроводі й відносної довжини ділянки магнітопроводу, що не підмагнічується. При цьому посилення зазначених чинників викликає збільшення процентного вмісту вищих непарних гармонік у струмі основної обмотки. Розглянуто можливість придушення вищих гармонік магніторушійної сили основної обмотки шляхом поперечного підмагнічування ярма змінним магнітним полем, при якому модуль результуючого вектора магнітної індукції в ділянці магнітопроводу, що підмагнічується, незмінний у часі. На основі проведених розрахунків гармонічного складу показано, що накладення в поперечній вісі постійного магнітного поля й косинусоїдального поля подвійної частоти дозволяє значно зменшити процентний вміст вищих гармонік у струмі основної обмотки.

Ключові слова: реактор, поперечне підмагнічування, гармонічний склад, сила, що намагнічує.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В энергосистемах находят применения шунтирующие реакторы для компенсации зарядной мощности линий [1], 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, 3]. При изменении режимов работы и конфигурации энергосистемы соответствующим образом должны меняться и индуктивные сопротивления реакторов.

Известными способами регулирования реактора является продольное или поперечное подмагничивание его магнитной систем, что приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, как следствие, к

уменьшению индуктивного сопротивления [4, 5]. 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 [6, 7]. 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 подмагничивании ярем в одном направлении по окружности. Указанные конструкции позволяют скомпенсировать четные гармоники в токе обмотки, однако секционированию

рование 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 [8, 9]. Известны конструкции трехфазных индукционных статических преобразователей и аппаратов с аксиальными симметричными магнитопроводами, в которых осуществляется поперечное подмагничивание стержней [9–11]. 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 конструкция индукционного статического преобразователя, которая состоит из шести одинаковых секций [8]. Обмотка подмагничивания охватывает внешнюю поверхность каждой секции магнитопровода и создает поперечное магнитное поле. Кроме увеличения материалоемкости основной обмотки, охватывающей смежные участки витых секций магнитопровода, недостатком данной конструкции является разомкнутый магнитопровод для потока подмагничивания, что способствует повышению мощности управления. Снижение материалоемкости обмоток и электромагнитной системы индукционного преобразователя возможно путем замены поперечного подмагничивания стержней на подмагничивание ярма с использованием индукторов для замыкания магнитного потока в поперечном направлении.

При подмагничивании магнитопровода реактора процентное содержание высших нечетных гармоник в токе рабочей обмотки изменяется в зависимости от степени насыщения магнитопровода и может значительно превышать допустимые значения. Компенсацию высших нечетных гармоник можно осуществить путем параллельного подключения двух реакторов, основные обмотки которых имеют соединение либо треугольника и звезды, либо правого и левого зигзага с углом сдвига в 15° . В результате 5-я и 7-я гармоники токов обеих обмоток находятся в противофазе и отсутствуют в токе, потребляемом из сети [1, 3]. Однако данное техническое решение требует наличия двух независимых магнитных систем и, как следствие, приводит к повышению массогабаритных показателей. Более эффективным способом компенсации высших гармоник является поперечное подмагничивание переменным магнитным полем, при котором результирующая магнитная индукция в подмагничиваемом участке магнитопровода в любой момент времени остается неизменной по величине. В этом случае магнитное сопротивление подмагничиваемого участка

становится линейным, способствует линеаризации зависимости магнитодвижущей силы от магнитного потока и обеспечивает резкое снижение процентного содержания высших гармоник.

Целью работы является анализ гармонического состава магнитодвижущей силы основной обмотки трехфазного реактора с радиальным симметричным магнитопроводом при поперечном подмагничивании ярма постоянным и переменным магнитными полями.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Конструкция предлагаемого реактора с радиальным симметричным магнитопроводом и поперечным подмагничиванием ярма представлена на рис. 1.

Магнитопровод реактора состоит из трех витых секций 1, которые при совмещении образуют радиальную симметричную конструкцию. Фазы основной трехфазной обмотки 2 охватывают смежные участки – стержни витого магнитопровода. Обмотка подмагничивания 3 располагается на индукторе 4, который, имея вид скобы, охватывает внешнюю часть магнитопровода и замыкает магнитный поток подмагничивания в поперечном направлении по отношению к магнитному потоку основной обмотки.

Анализ работы реактора (рис. 1) выполняется по упрощенной схеме замещения магнитной цепи (рис. 2).

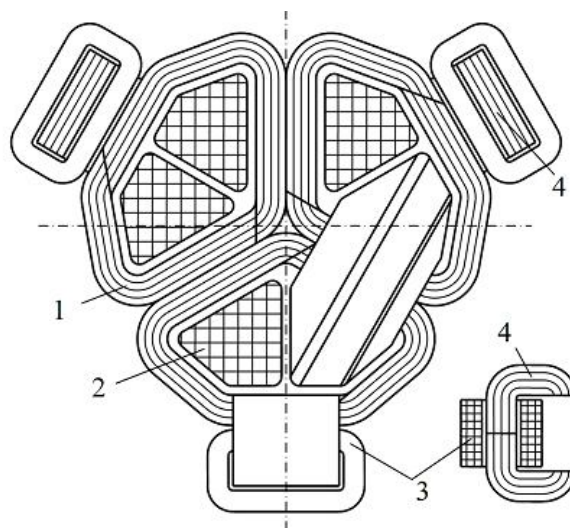


Рисунок 1 – Конструкция трехфазного реактора с поперечным подмагничиванием

На рис. 2 введены следующие обозначения: R_δ – магнитное сопротивление стыкового зазора в секции магнитопровода; R_n и $R_{\bar{n}}$ – магнитное сопротивление подмагничиваемой и неподмагничиваемой части магнитопровода; F_a, F_b, F_c – намагничивающие силы фазных обмоток реактора; Φ_1, Φ_2, Φ_3 – магнитные потоки секций магнитопровода.

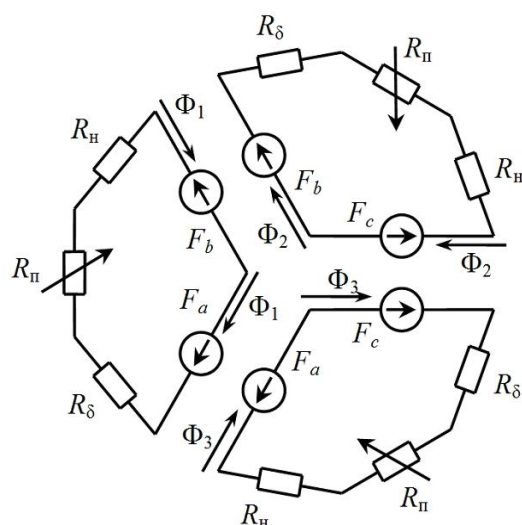


Рисунок 2 – Схема замещения магнитной цепи

Представленной схеме замещения соответствует система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 (R_n + R_n + R_\delta) &= F_a - F_b = F_1; \\ \Phi_2 (R_n + R_n + R_\delta) &= F_b - F_c = F_2; \\ \Phi_3 (R_n + R_n + R_\delta) &= F_c - F_a = F_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Положим, что обмотки переменного тока реактора создают синусоидальные магнитные потоки:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_A &= \Phi_m \sin(\omega t) = \Phi_1 - \Phi_3; \\ \Phi_B &= \Phi_m \sin(\omega t - \pi/3) = \Phi_2 - \Phi_1; \\ \Phi_C &= \Phi_m \sin(\omega t - 2\pi/3) = \Phi_3 - \Phi_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В этом случае, в соответствии с системами уравнений (1) и (2), при насыщении магнитной цепи возникают нечетные гармоники, за исключением кратных трем, в намагничивающих силах F_1, F_2, F_3 , а также нечетные гармоники, кратные трем, в магнитных потоках секций Φ_1, Φ_2, Φ_3 .

Уравнение связи между магнитным потоком и намагничивающей силой для одной секции магнитопровода можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1(t) &= \Phi_1(t)(R_n + R_n + R_\delta) = \\ &= B(t)l \left(\frac{l_n/l}{\mu_n(B(t))} + \frac{l_n/l}{\mu_n(B(t), B_{подм})} + \frac{l_\delta/l}{\mu_0} \right); \\ F_{yo}(t) &= B(t) \left(\frac{l_n/l}{\mu_n(B(t))} + \frac{l_n/l}{\mu_n(B(t), B_{подм})} + \frac{l_\delta/l}{\mu_0} \right); \\ F_{yo}(t) &= \frac{F_1(t)}{l}; \quad B(t) = \frac{\Phi_1(t)}{S}, \end{aligned}$$

где l и S – длина и площадь поперечного сечения секции магнитопровода; l_n, l_n и l_δ – длины неподмагничиваемого и подмагничиваемого участков секции, а

также величина стыкового зазора; μ_n и μ_n – значение магнитной проницаемости неподмагниченной и подмагниченной частей секции; $B(t)$ – значение индукции в магнитопроводе; $B_{подм}$ – магнитная индукция поперечного поля подмагничивания; $F_{yo}(t)$ – удельное значение намагничивающей силы на единицу длины.

При использовании изотропной стали магнитные проницаемости μ_n и μ_n определяются по соотношению результирующей магнитной индукции к напряженности магнитного поля в рассматриваемом участке магнитопровода:

$$\begin{aligned} \mu_n(B(t)) &= \frac{B(t)}{H(B(t))}; \\ \mu_n(B(t), B_{подм}) &= \frac{\sqrt{B(t)^2 + B_{подм}^2}}{H(\sqrt{B(t)^2 + B_{подм}^2})}, \end{aligned}$$

где $H(B)$ – напряженность магнитного поля, определенная по основной кривой намагничивания.

Разработана программа, которая по амплитуде B_{m1} первой гармоники $B(t)$ итерационным методом подбирает значения амплитуд третьей B_{m3} и девятой B_{m9} гармоник, при которых в намагничивающей силе $F_{yo}(t)$ такие составляющие отсутствуют. Расчет гармоник осуществляется по дискретному преобразованию Фурье при количестве расчетных точек на период 200. В расчетах использовались характеристики холоднокатаной изотропной стали марки 2412, основная кривая намагничивания которой была задана с помощью линейной интерполяции по табличным данным.

Результаты расчетов представлены в табл. 1. Амплитуды пятой F_{m5} и седьмой F_{m7} гармоник намагничивающей силы $F_{yo}(t)$ представлены в процентах по отношению к амплитуде первой гармоники F_{m1} . Аналогично представлена третья гармоника B_{m3} магнитной индукции $B(t)$ в процентах по отношению к B_{m1} .

По полученным результатам можно сделать определенные выводы. Во-первых, путем поперечного подмагничивания ярма в рассматриваемой конструкции реактора можно обеспечить широкий диапазон регулирования индуктивности основной обмотки (например, при $B_{m1} = 1,4$ Тл, $l_n/l = 0,2$ и $l_\delta/l = 10^{-5}$ изменение $B_{подм}$ от нуля до 1,8 Тл вызывает увеличение удельной намагничивающей силы F_{m1} , а значит и тока основной обмотки в 18,2 раза; при увеличении подмагничиваемого участка в два раза аналогичное изменение $B_{подм}$ обеспечивает кратность изменения F_{m1} , равное 35,3). Во-вторых, при увеличении удельной длины подмагничиваемого участка l_n/l и уменьшении удельной длины стыкового зазора l_δ/l расширяется диапазон регулирования индуктивности и увеличивается процентное содержание гармоник как в намагничивающей силе основной обмотки, так и в магнитном потоке секции магнитопровода (увеличение относительной длины стыкового зазора l_δ/l от 10^{-5} до 10^{-4}

привело к уменьшению кратности изменения F_{m1} в 3,5–6,5 раз, а увеличение подмагничиваемого участка l_n в два раза при $l_8/l = 10^{-5}$ и при $l_8/l = 10^{-4}$ обеспечило увеличение кратности изменения F_{m1} минимум в 1,8 и в 1,35 раз соответственно). В-третьих, эффективность регулирования увеличивается при увеличении амплитуды первой гармоники магнитной индукции B_{m1}

(увеличение B_{m1} с 1 Тл до 1,4 Тл привело к увеличению кратность изменения F_{m1} в 2–3,3 раза). В-четвертых, при подмагничивании постоянным полем в токе основной обмотки пятая гармоника может достигать 25 %, а седьмая гармоника – 10 %, что является неприемлемым последствием нелинейности магнитной системы.

Таблица 1 – Результаты расчетов при подмагничивании постоянным током

Исходные данные		$l_n/l = 0,8; l_n/l = 0,2$								$l_n/l = 0,6; l_n/l = 0,4$							
		$l_8/l = 10^{-5}$				$l_8/l = 10^{-4}$				$l_8/l = 10^{-5}$				$l_8/l = 10^{-4}$			
$B_{подм},$ Тл	$B_{m1},$ Тл	$B_{m3},$ %	$F_{m1},$ А/см	$F_{m5},$ %	$F_{m7},$ %	$B_{m3},$ %	$F_{m1},$ А/см	$F_{m5},$ %	$F_{m7},$ %	$B_{m3},$ %	$F_{m1},$ А/см	$F_{m5},$ %	$F_{m7},$ %	$B_{m3},$ %	$F_{m1},$ А/см	$F_{m5},$ %	$F_{m7},$ %
0	1	1,36	9,74	0,43	0,02	0,17	81,4	0,06	0	1,36	9,74	0,43	0,02	0,17	81,4	0,06	0
1	1	4,26	10,5	0,92	0,04	0,66	82,3	0,22	0,03	6,34	11,3	0,83	0,15	1,14	83,2	0,35	0,05
1,4	1	11,6	17,3	3,93	0,77	3,36	89,8	0,2	0,13	13,7	24,6	7,18	0,77	5,56	97,7	0,15	0,27
1,6	1	10,3	26,9	4,02	0,54	3,85	99,3	0,27	0,12	11,5	43,8	5,53	0,82	5,93	117	0,96	0,2
1,8	1	16	56	11,7	5,23	11,6	132	1,35	1,92	16,4	102	13,8	5,58	13,7	178	4,59	3,19
0	1,4	4,49	13,5	0,64	0,19	0,71	107	0,2	0,01	4,49	13,5	0,64	0,19	0,71	107	0,2	0,01
1	1,4	13,0	20,2	4,75	2,1	4,37	123	1	0,06	15,3	25,4	9,67	2,68	6,45	129	0,8	0,22
1,4	1,4	14,7	39,4	10,3	0,47	7,01	142	0,81	0,09	15,9	63,8	13,4	1,03	9,76	167	2,7	0,09
1,6	1,4	17,2	78,6	21,5	9,7	13,9	188	4,18	3,64	17,5	142	24,7	10,6	15,5	251	9,85	6
1,8	1,4	18,1	245,3	20,4	2,4	15,7	348	12,6	0,7	18,2	476	21,2	2,61	17	579	16,3	1,48

Для устранения высших гармоник введем подмагничивание переменным током, при котором индукция поперечного магнитного поля будет определяться выражением

$$B_{подм}(t) = \sqrt{B_{\Sigma max}^2 - [B_{m1} \sin(\omega t)]^2} \quad (3)$$

В этом случае результирующая магнитная индукция в подмагничиваемом участке с течением времени, меняя свое направление, не изменяется по величине

$$B_{\Sigma}(t) = \sqrt{B(t)^2 + B_{подм}(t)^2} = \sqrt{[B_{m1} \sin(\omega t)]^2 + B_{\Sigma max}^2 - [B_{m1} \sin(\omega t)]^2} = B_{\Sigma max}$$

Из полученных результатов, представленных в табл. 2, можно сделать вывод, что при регулировании магнитной индукции поперечного поля по уравнению (3) удастся значительно уменьшить амплитуды высших гармоник. Кроме того, подобное регулирование полностью исключает параметрическую индуктивную связь между обмоткой управления и основной обмоткой. К недостаткам подобного регулирования можно отнести сложность его реализации из-за присутствия в (3) квадратного корня.

Указанный недостаток можно устранить путем упрощения закона регулирования, представив (3) в виде суммы двух первых членов разложения в ряд Фурье:

$$B_{подм}(t, B_{\Sigma max}, B_{m1}) = B_{m1} [b_0 (B_{\Sigma max} / B_{m1}) + b_2 (B_{\Sigma max} / B_{m1}) \cos(2\omega t)] \quad (4)$$

$$b_0 \left(\frac{B_{\Sigma max}}{B_{m1}} \right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{\left[\frac{B_{\Sigma max}}{B_{m1}} \right]^2 - [\sin(\varphi)]^2} d\varphi$$

$$b_2 \left(\frac{B_{\Sigma max}}{B_{m1}} \right) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(2\varphi) \sqrt{\left[\frac{B_{\Sigma max}}{B_{m1}} \right]^2 - [\sin(\varphi)]^2} d\varphi$$

Таблица 2 – Результаты расчетов при поддержании результирующей магнитной индукции в подмагничиваемом участке постоянной

Исходные данные		$l_n/l = 0,8; l_n/l = 0,2, l_8/l = 10^{-5}$				
$B_{m1},$ Тл	$B_{\Sigma max},$ Тл	$B_{m3},$ %	$F_{m1},$ А/см	$F_{m5},$ %	$F_{m7},$ %	
1	1	0,88	9,81	0,35	0,04	
1	1,4	0,6	11,1	0,24	0	
1	1,72	0,24	22,2	0,08	0,01	
1	1,98	0,04	51,8	0,01	0	
1	2,12	0,027	166,1	0,01	0	
1,4	1,4	3,3	16,8	1	1	
1,4	1,72	1,46	32,4	0,5	0,61	
1,4	1,98	0,24	73,7	0,1	0,4	
1,4	2,12	0,17	240,5	0,07	0,1	

В табл. 3, 4 представлены результаты расчетов при регулировании поля подмагничивания по уравнению (4). Как и в случае регулирования по выражению (3)

наблюдается значительное снижение процентного содержания высших гармоник в токе основной обмотки, величина которых не превышает 5 %. В то же время закон регулирования (4) проще реализовать на базе микроконтроллерной техники при заранее определенных коэффициентах b_0 и b_2 .

Таблица 3 – Результаты расчетов при регулировании поперечного магнитного поля по упрощенному закону ($B_{m1} = 1,4$ Тл)

Исходные данные		$l_w/l = 0,8; l_n/l = 0,2; l_g/l = 10^{-5}$				
$B_{\Sigma max}$, Тл	B_0 , Тл	B_2 , Тл	B_{m3} , %	F_{m1} , А/см	F_{m5} , %	F_{m7} , %
1,4	0,89	0,594	4,03	16,4	3,41	0,22
1,72	1,38	0,358	2,17	32,0	2,13	0,52
1,98	1,7	0,289	0,99	72	4,32	0,02
2,12	1,87	0,264	0,69	232,9	1,38	0,09

Таблица 4 – Результаты расчетов при регулировании поперечного магнитного поля по упрощенному закону ($B_{m1} = 1$ Тл)

Исходные данные		$l_w/l = 0,8; l_n/l = 0,2; l_g/l = 10^{-5}$				
$B_{\Sigma max}$, Тл	B_0 , Тл	B_2 , Тл	B_{m3} , %	F_{m1} , А/см	F_{m5} , %	F_{m7} , %
1	0,64	0,424	0,97	9,8	0,52	0,05
1,4	1,2	0,21	0,83	11,1	0,55	0,06
1,72	1,56	0,16	0,47	22,2	0,47	0,02
1,98	1,85	0,136	0,31	51,5	1,04	0,05
2,12	2	0,126	0,18	166,3	0,35	0

Коэффициенты b_0 и b_2 являются безразмерными и зависят от отношения суммарной магнитной индукции в подмагничиваемом участке $B_{\Sigma max}$ к амплитуде первой гармоники магнитной индукции B_{m1} :

$$k = B_{\Sigma max} / B_{m1}.$$

Графики зависимостей b_0 и b_2 от коэффициента k представлены на рис. 3, 4 соответственно.

При программной реализации закона регулирования (4) графические зависимости коэффициентов b_0 и b_2 от глубины подмагничивания k можно представить в табличной форме с определением промежуточных значений методом линейной интерполяции или в виде функций, полученных путем аппроксимации. Функции должны содержать арифметические действия, которые легко реализуются при программировании. Например, можно использовать следующие зависимости, погрешность которых не превышает 5 %:

$$b_0(k) = 0,012k + 0,66;$$

$$b_2(k) = \frac{0,0025k + 0,425}{0,04k + 1}.$$

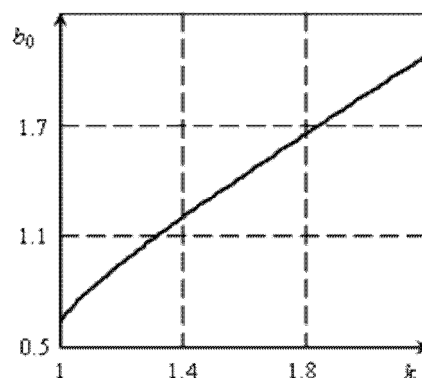


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента b_0 от коэффициента k

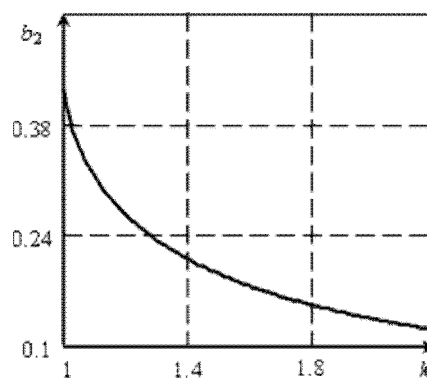


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента b_2 от коэффициента k

ВЫВОДЫ. 1. Конструкция трехфазного реактора с радиальным симметричным магнитопроводом и поперечным подмагничиванием ярма позволяет получить регулирование индуктивности в широком диапазоне. 2. Эффективность регулирования увеличивается при повышении амплитуды первой гармоники магнитной индукции поля основной обмотки B_{m1} , уменьшении величины стыкового зазора l_g и относительной длины неподмагничиваемого участка магнитопровода l_w/l . Усиление указанных факторов увеличивает содержание в токе основной обмотки пятой и седьмой гармоник. 3. При поперечном подмагничивании постоянным полем в токе основной обмотки пятая гармоника может достигать 25, а седьмая гармоника – 10 %. 4. Для устранения высших гармоник в токе основной обмотки результирующая магнитная индукция в подмагничиваемом участке магнитопровода не должна меняться по величине с течением времени. 5. Предложен упрощенный закон регулирования магнитной индукции поперечного поля подмагничивания, в соответствии с которым она представляется в виде суммы косинусоидальной составляющей двойной частоты и постоянной составляющей. 6. Представлены графики

и функции, полученные в результате их аппроксимации, амплитуд постоянной и переменной составляющих магнитной индукции поперечного поля в зависимости от глубины подмагничивания. 7. При предложенном регулировании поля подмагничивания в токе основной обмотки и в магнитном потоке секций магнитопровода значительно ослабляются гармоники, что уменьшает активные потери и улучшает энергетические показатели реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В., Карпов А.С., Шескин Е.Б. и др. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / Под ред. Г.А. Евдокунина. – СПб.: Родная Ладога, 2013. – 280 с.
2. Торощев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. – М.: НТФ "Энергопрогресс", 2004. – 88 с.
3. Панченко М.В., Огарь А.С. Регулятор реактивной мощности с переменной частотой питания // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2002. – Вип. 1/2002 (12). – С. 106–108.
4. Соколов С.Е., Долгополов А.Г. Управляемые реакторы. Обзор технологий // Информационно-справочное издание "Новости электротехники". – СПб, 2012. – Вип. 3 (75). – С. 18–22.
5. Цыганов С.И., Кондратенко Д.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы как средство повышения эффективности работы электроэнергетических систем // Электро. Электротехника, электротехника, электротехническая промышленность. – М.: Электрозавод, 2008. – Вып. 1. – С. 28–32.

– М.: Электрозавод, 2008. – Вып. 1. – С. 28–32.

6. Патент на винахід України № 104244. Електричний реактор з підмагнічуванням / А.М. Брянцев. – Заявл. 18.02.2011; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 9 с.

7. Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы: сборник статей / Под ред. А.М. Брянцева. – М.: Знак, 2010. – 288 с.

8. Кимстач О.Ю. Трансформатор-преобразователь количества фаз с подмагничиванием переменным током // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 148–150.

9. Деклараційний патент на винахід України № 70866. Електромагнітна система з регулюванням підмагнічуванням / А.А. Ставинський, О.П. Коновалов, О.О. Плахтир та ін. – Заявл. 30.12.2003; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10. – 3 с.

10. Плахтир О.О., Кошкін Д.Л. Конструкторськотехнологічні рішення удосконалення регульованих статичних індукційних пристроїв для електронних систем і перетворювальної техніки // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – К.: КНУТД, 2012. – Вип. 1. – С. 39–42.

11. Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Плахтир О.О. Способи забезпечення спеціальних вимог до силового електрообладування на основі трансформаторів і трансформаторних преобразователів з просторовою структурою активної частини // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХП», 2005. – Вип. 4. – С. 30–36.

THREE-PHASE REACTOR WITH RADIAL SYMMETRIC MAGNETIC CIRCUIT WHICH IS CONTROLLED BY YOKES TRANSVERSE MAGNETIC BIASING

A. Stavinskiy, S. Novogretskiy, A. Prudnykov

National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov
prosp. Geroiv Stalingrada, 9, Mykolayiv, 54025, Ukraine. E-mail: ngrek2011@gmail.com

Purpose. To analyze the harmonic structure of main winding three-phase reactor magnetomotive force with the radial symmetric magnetic circuit with the yoke transverse magnetic biasing by constant and variable magnetic fields. **Methodology.** The magnetic circuit is represented as a series connection of generated by the main winding reactor current magnetomotive force sources, the butt gap magnetic resistances, and the parts of magnetic circuit with magnetic biasing and without it. The third and ninth magnetic induction harmonics in magnetic circuit parts without biasing were determined by the method of successive approximations with the given first harmonic. Harmonic structure was determined by the discrete Fourier transformation. **Results.** The regulation efficiency with the transverse constant magnetic biasing increases when generated by the primary coil magnetic field induction increases, the magnetic circuit butt gap and the relative length of magnetic circuit part without biasing decreases. Amplification of these factors causes the percentage of higher odd harmonics increasing in the primary winding current up to 20% or more. Suppression of the higher harmonics in the main winding magnetomotive force is achieved by yoke transverse magnetic biasing with alternating magnetic field, in which the resultant magnetic induction vector module in the magnetizing part of the magnetic circuit is unchanged over time. **Originality.** It was shown for the first time that by the yoke transverse magnetic biasing can be provided at the same time a wide inductance regulation range and low primary winding harmonic current in a three-phase reactor with a radial symmetric magnetic circuit. **Practical value.** For practical implementation of transverse alternating magnetic biasing was prompted to represent it as the sum of the constant component and the double frequency cosine component. References 11, tables 4, figures 4.

Key words: reactor, the radial symmetrical magnetic circuit, yoke transverse magnetic biasing, harmonic structure, magnetomotive force.

REFERENCES

1. Dmitriev, M.V., Karpov, A.C., Sheskin, E.B. et al. (2013), Shunt reactor controlled by magnetic bias [*Upravliaemye podmagnichivaniem shuntiruyushchie reactory*], Rodnaya Ladoga, Peterburg. (in Russian).
2. Toroptsev, N.D. (2004), Asynchronous generators for stand-alone power plant [*Asinchronye generatory dlia avtonomnyh electroenergeticheskikh sistem*], NTF "Energoprogress", Moscow. (in Russian)
3. Panchenko, M.V. and Ogar, A.S. (2002), "Reactive power controller with variable frequency of supply", *Visnyk Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universytetu: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 1, no. 12, pp. 106–108. (in Russian)
4. Sokolov, S.E. and Dolgoplov, A.G. (2012), "Controlled reactors. Technology Review", *Informatsyonno-spravochnoe izdanie "Novosti electrotehniki"*, Vol. 3, no. 75, pp. 18–22. (in Russian)
5. Tsyganov, S.I. and Kondratenko, D.V. (2008), "Shunt reactor controlled by magnetic bias as instrument for productivity increase of electrical power systems", *Electro. Electrotehnika, electroenergetika, electrotehnicheskaya promyshlennost*, Vol. 1, pp. 28–32. (in Russian)
6. Briantsev, A.M. (2014), *Patent na vynahid Ukrayiny № 104244. Electrychnyi reactor z pidmagnichuvanniam* [Patent of Ukraine № 104244. Electrical reactor with magnetic bias], Bul. № 1. (in Ukrainian)
7. Briantsev, A.M. (2010), Electrical reactor controlled by magnetic bias. Collection of scientific articles, [*Upravliaemye podmagnichivaniem electricheskie reactory. Sbornik statey*], Znak, Moscow. (in Russian)
8. Kimstach, O.Yu. (2005), "Transformer - phase converter with alternate-current magnetic biasing", *Visnyk Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universytetu: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 3, no. 32, pp. 148–150. (in Russian)
9. Stavinskiy, A.A., Konovalov, O.P., Plahtyr, O.O. and Kimstach, O.Yu. (2004), *Deklaratsiynyi patent na vynahid Ukrayiny № 70866. Elektromagnitna systema z regulyvannyam pidmagnichuvannyam* [Patent of Ukraine №70866. Electromagnetic system with control by magnetic bias], Bul. № 10. (in Ukrainian)
10. Plahtyr, O.O. (2012), "Design and technological solutions for improvement of controlled static induction converter for electronic systems and converter equipments", *Visnyk Kyivskogo natsionalnogo universytetu tehnologiy ta dizaynu*, Vol. 1, pp. 39–42. (in Ukrainian)
11. Stavinskiy, A.A., Stavinskiy, R.A. and Plahtyr, O.O. (2005), "Methods ensuring of specific requirements for power equipments based on transformer and transformer converter with space structure of active part", *Elektrotehnika i elektromehanika*, Vol. 4, pp. 30–36. (in Russian)

Стаття надійшла 24.05.2016.