

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3.07

Новогрецький 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

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО РЕАКТОРА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ПОДМАГНИЧИВАНИИ ЯРМА

Рассмотрен трехфазный регулируемый реактор симметричной радиальной конструкции с поперечным подмагничиванием участков ярма. На основе схемы замещения магнитной системы произведен расчет гармонического состава магнитодвижущей силы основной обмотки в зависимости от интенсивности поперечного постоянного поля подмагничивания. На диапазон регулирования тока реактора оказывает существенное влияние относительная длина стыкового зазора и магнитная индукция, создаваемая основной обмоткой. Поперечное подмагничивание участков ярма неизменно приводит к увеличению процентного содержания гармоник в токе основной обмотки. Показано, что при неизменной во времени намагничивающей силе обмотки подмагничивания уровень гармоник в токе реактора значительно ниже, чем при неизменном магнитном потоке этой обмотки.

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

Постановка проблемы. В энергосистемах применяются 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. Известным способом регулирования тока 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 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 ярма в одном направлении, а также радиального симметричного шестистержневого реактора с расположением обмоток на трех стержнях и подмагничиванием ярма 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. 1; 8, с. 2]. Известны конструкции трехфазных индукционных статических преобразователей и аппаратов с аксиальными симметричными магнитопроводами, в которых осуществляется поперечное подмагничивание стержней [9, с. 33]. Для уменьшения массогабаритных показателей предложено конструктивно разделять стержни 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, с. 2]. 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 при замене 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 с. 14; 3 с. 18]. 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 [10, с. 74].

Постановка задания. Целью работы – анализ гармонического состава магнитодвижущей силы основной обмотки трехфазного реактора с радиальным симметричным магнитопроводом при поперечном подмагничивании ярма постоянным магнитным полем.

Изложение основного материала исследования. Конструкция рассматриваемого реактора с радиальным симметричным магнитопроводом и поперечным подмагничиванием ярма представлена на рисунке 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.

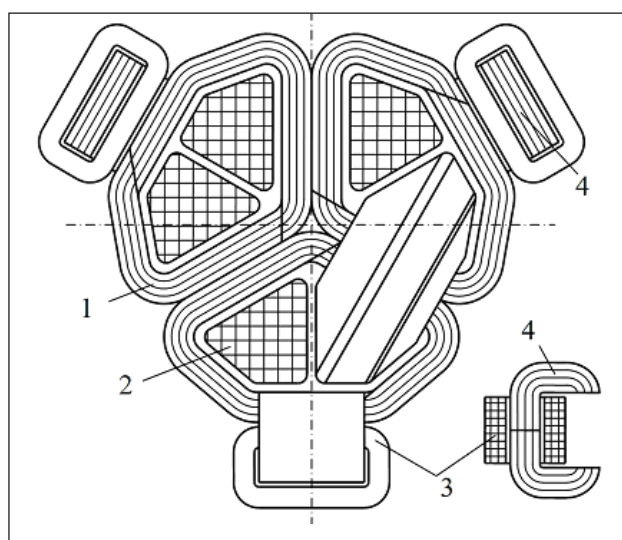


Рис. 1. Конструкция трехфазного реактора с поперечным подмагничиванием

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

На рис. 2 указаны следующие обозначения: R_δ и $R_{n\delta}$ – магнитное сопротивление стыкового зазора в секции магнитопровода и индуктора; R_{np} , R_n и R_{mp} , R_{mn} – магнитное сопротивление подмагничиваемой и неподмагничиваемой частей магнитопровода секции и цепи подмагничивания; F_a , F_b , F_c , F_n – намагничивающие силы фазных обмоток реактора и обмотки подмагничивания; Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , Φ_n – магнитные потоки секций магнитопровода и индуктора.

Представленной схеме замещения соответствует система уравнений:

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

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

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

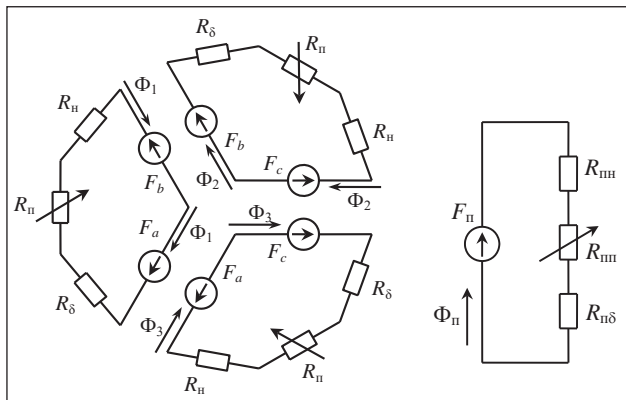


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи

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 кратных 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:

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

где l и S – длина и площадь поперечного сечения секции магнитопровода; l_{np} , l_n и l_δ – длины неподмагничиваемого и подмагничиваемого участков секции, а также величина стыкового зазора; μ_n и μ_n – значения магнитной проницаемости неподмагниченной и подмагниченной частей секции; $B(t)$ – значение индукции в магнитопроводе в момент времени t ; $B_n(t)$ – магнитная индукция поперечного поля подмагничивания; $F_{yn}(t)$ – удельное значение намагничивающей силы на единицу длины.

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

$$\mu_n(B(t)) = \frac{B(t)}{H(B(t))};$$

$$\mu_n(B(t), B_n(t)) = \frac{\sqrt{B(t)^2 + B_n(t)^2}}{H(\sqrt{B(t)^2 + B_n(t)^2})},$$

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

Такое же уравнение можно получить и для магнитной цепи поперечного подмагничивания:

$$\begin{aligned} F_n &= \Phi_n(t)(R_{nn} + R_{nn} + R_{n\delta}) = \\ &= B_n(t) l_n \left(\frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B_n(t))} + \frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B(t), B_n(t))} + \frac{l_{n\delta}/l_n}{\mu_0} \right); \\ F_{ynn} &= B_n(t) \left(\frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B_n(t))} + \frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B(t), B_n(t))} + \frac{l_{n\delta}/l_n}{\mu_0} \right), \end{aligned}$$

где l_n и S_n – длина и площадь поперечного сечения секции магнитопровода индуктора; l_{np} , l_{nn} и $l_{n\delta}$ – длины неподмагничиваемого индуктора и высота подмагничиваемого участка секции, а также величина стыкового зазора; F_{ynn} – удельное значение намагничивающей силы подмагничивающей обмотки на единицу длины.

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 $F_{yn}(t)$ 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. Программа также содержит подпрограмму, которая для задан-

Таблица 1

Результаты расчетов при $B_{подм} = const$

Исходные данные	$l_n/l = 0,8; l_n/l = 0,2; l_{III}/l_n = 0,7; l_{III}/l_n = 0,3$								
	$l_8/l = l_{п8}/l_n = 10^{-5}$					$l_8/l = l_{п8}/l_n = 10^{-4}$			
B_n , Тл	B_{m1} , Тл	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	1	4,26	10,5	0,92	0,04	0,66	82,3	0,22	0,03
1,4	1	11,6	17,3	3,93	0,77	3,36	89,8	0,2	0,13
1,6	1	10,3	26,9	4,02	0,54	3,85	99,3	0,27	0,12
1,8	1	16	56	11,7	5,23	11,6	132	1,35	1,92
0	1,4	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
1,4	1,4	14,7	39,4	10,3	0,47	7,01	142	0,81	0,09
1,6	1,4	17,2	78,6	21,5	9,7	13,9	188	4,18	3,64
1,8	1,4	18,1	245,3	20,4	2,4	15,7	348	12,6	0,7

ного значения $B(t)$ и F_{yon} рассчитывает итерационным методом мгновенное значение $B_n(t)$.

Рассмотрим два основных режима подмагничивания поперечным магнитным полем. В одном из них пусть сохраняется постоянство магнитной индукции поля подмагничивания ($B_{подм} = const$), а во втором – постоянство намагничивающей силы обмотки подмагничивания ($F_{yon} = const$).

В таблице 1 представлены расчетные данные, полученные для случая $B_{подм} = const$. 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 $l_8/l = 10^{-5}$ изменение $B_{подм}$ от 0 до 1,8 Тл вызывает увеличение удельной намагничивающей силы F_{m1} , а значит, и тока основной обмотки, в 18,2 раза). Во-вторых, при уменьшении удельной длины стыкового зазора l_8/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_8/l от 10^{-5} до 10^{-4} привело к уменьшению кратности изменения F_{m1} в 3,5...6,5 раз). 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 21%, а седьмая гармоника – 9%, что является неприемлемым последствием нелинейности магнитной системы.

Рассмотрим режим $F_{yon} = const$, который рассчитывается сложнее ввиду изменения во времени $B_{подм}$, однако на практике реализуется значительно проще, так как он предполагает постоянство тока в обмотке подмагничивания. В таблице 2 представлены результаты расчета для данного режима.

Сопоставив данные в обеих таблицах, можно убедиться, что в случае поддержания постоянной намагничивающей силы обмотки подмагничивания наблюдается значительное снижение процентного содержания пятой и седьмой гармоник в токе фазной обмотки. Это обусловлено тем, что при геометрическом сложении продольного и поперечного полей будут иметь место максимум и минимум суммарной магнитной индукции. При максимуме будет наблюдаться снижение магнитной проницаемости подмагничиваемого участка и уменьшение магнитного потока подмагничивания, а при минимуме магнитный поток будет увеличиваться. В результате, при поддержании постоянства намагничивающей силы обмотки подмагничивания (а значит, и постоянства тока, протекающего через нее) магнитный поток подмагничивания будет меняться с двойной частотой, причем максимум переменной составляющей будет соответствовать нулевому значению продольного магнитного потока от основной обмотки. Как показано в [10, с. 75], такая переменная составляющая способствует уменьшению гармоник, а при определенной амплитуде вообще позволяет избавиться от них.

Результаты расчетов при $F_{удп} = const$

Исходные данные		$I_{II}/I = 0,8; I_{III}/I = 0,2; I_{IV}/I = 0,7; I_{V}/I = 0,3$							
		$I_{IV}/I = I_{V}/I = 10^{-5}$				$I_{IV}/I = I_{V}/I = 10^{-4}$			
$F_{удп},$ А/см	$B_{m1},$ Тл	$B_{m3},$ %	$F_{m1},$ 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
75	1	8	24,7	2,41	0,32	0,42	81,9	0,14	0,04
175	1	8,52	38,0	2,25	0,03	2,81	95,2	0,22	0,002
300	1	11,1	69,3	5,41	0,54	3,97	110,5	0,074	0,088
0	1,4	4,49	13,5	0,64	0,19	0,71	107	0,2	0,01
75	1,4	11,3	45,1	5,02	0,43	3,01	120	0,8	0,73
175	1,4	14,4	82,8	8,9	0,41	5,37	145,8	0,51	0,09
300	1,4	13,1	138,4	7,81	1,24	9,58	189,5	2,5	0,82
500	1,4	10,9	220,5	5,5	1,45	9,4	273,6	3,51	0,56

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} и уменьшении величины стыкового зазора l_{δ} .

3. Режим постоянства намагничивающей силы обмотки подмагничивания сопровождается значительно меньшими уровнями гармоник в токе реактора, чем в режиме постоянства магнитного потока подмагничивания.

4. Режим постоянства намагничивающей силы легко реализуем при соединении обмоток подмагничивания, принадлежащих разным фазам, последовательно. В результате, сумма ЭДС, наводимых в обмотках переменной составляющей магнитного потока подмагничивания, будет равна нулю, и влияние обмоток на источник питания будет минимальным.

5. Усиление переменной составляющей магнитного потока подмагничивания может позволить еще больше уменьшить процентное содержание высших гармоник в намагничивающей силе фазной обмотки реактора.

Список литературы:

1. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин, А.Г. Долгополов, Д.В. Кондратенко; 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. Новости электротехники: информационно-справочное издание. 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; опубл. 10.01.2014, Бюл. №1. 9 с.
6. Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы: сборник статей / под редакцией А.М. Брянцева. М.: Знак, 2010. 288 с.
7. Трансформатор-перетворювач з поперечним підмагнічуванням змінним струмом: пат. 79028 Україна: МПК H01F 29/00. № а200505669; заявл. 13.06.2005; опубл. 10.05.2007. Бюл. № 6. 3 с.
8. Електромагнітна система з регулюванням підмагнічуванням: пат. 70866 Україна: МПК H01F 29/00. № 20031213110; заявл. 30.12.2003; опубл. 15.10.2004. Бюл. № 10. 3 с.
9. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Платириь О.О. Способы обеспечения специальных требований к силовому электрооборудованию на основе трансформаторов и трансформаторных преобразователей с пространственной структурой активной части. Электротехника і електромеханіка. Х.: НТУ ХПІ, 2005. Вып. 4. С. 30–36.
10. 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.

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД СТРУМУ ТРИФАЗНОГО РЕАКТОРА ЗА ПОПЕРЕЧНОГО ПІДМАГНІЧУВАННЯ ЯРМА

Розглянуто трифазний регульований реактор симетричної радіальної конструкції з поперечним підмагнічуванням ділянок ярма. На основі схеми заміщення магнітної системи зроблений розрахунок гармонійного складу магніторушійної сили основної обмотки залежно від інтенсивності поперечного постійного поля підмагнічування. На діапазон регулювання струму реактора впливає відносна довжина стикового зазору і магнітна індукція, створювана основною обмоткою. Поперечне підмагнічування ділянок ярма незмінно приводить до збільшення процентного вмісту гармонік у струмі основної обмотки. Показано, що за незмінної в часі сили обмотки підмагнічування, що намагнічує, рівень гармонік у струмі реактора значно нижчий, ніж за незмінного магнітного потоку цієї обмотки.

Ключові слова: реактор, магнітопровід, намагнічуюча сила, поперечне підмагнічування, гармонійний склад.

THE CURRENT HARMONIC STRUCTURE OF THE THREE-PHASE REACTOR WITH THE YOKE TRANSVERSE MAGNETIC BIASING

A three-phase controlled reactor with a symmetrical radial structure with transverse magnetic biasing of the yokes sections is considered. Based on the magnetic system equivalent scheme, the harmonic structure of the main winding magnetomotive force as a function of the intensity of the transverse constant magnetizing field is calculated. The reactor current control range is significantly influenced by the relative length of the magnetic gap and magnetic induction, which is created by the main winding. The transverse magnetic biasing of the yokes sections permanently leads to the harmonics percentage increase in the main winding current. It is shown that with the bias winding magnetizing force constant in time, the reactor current harmonics level is much lower than with the constant magnetic flux of this winding.

Key words: reactor, magnetic circuit, magnetizing force, transverse bias, harmonic structure.