

НОВЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ФАЗОСДВИГАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

Пентегов И.В., д.т.н., проф., Рымар С.В., к.т.н., с.н.с.
Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины
Украина, 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. +38(044) 227-23-88, e-mail: elmag@paton.kiev.ua

Волков И.В., д.т.н., проф., чл.-корр. НАН Украины
Институт электродинамики НАН Украины
Украина, 03680, Киев-57, пр. Победы, 56
тел. +38(044) 456-20-51, e-mail: volk@elan-ua.net

Ларченко Б.Б.
Черниговский государственный технологический университет
Украина, 14000, Чернигов, ул. Шевченко, 95
тел. +38(04622) 3-22-99, e-mail: boris@inel.stu.cn.ua

M. Levin, P. Eng., Presid.
MIRUs International Inc.
6805 Invader Cres., Unit #12, Mississauga, Ontario, Canada L5T 2K6
tel. (905) 565-6900 Ext. 12, e-mail: michael@mirusinternational.com, <http://www.mirusinternational.com>

Розроблені нові фазозсувні автотрансформаторні пристрої пригнічення вищих гармонік струму, які можуть використовуватися в трифазних електричних мережах без нульового проводу при роботі з 12-пульсними схемами випрямлячів і з рівномірно розподіленими навантаженнями. Нова конструкція пристроїв забезпечує покращені масогабаритні і техніко-економічні характеристики за рахунок розміщення обмоток тільки на крайніх стержнях магнітопровода, з вільним центральним стержнем.

Разработаны новые фазосдвигающие автотрансформаторные устройства подавления высших гармоник тока, которые могут использоваться в трехфазных электрических сетях без нулевого провода при работе с 12-пульсными схемами выпрямителей и с равномерно распределенными нелинейными нагрузками. Новая конструкция устройств обеспечивает улучшение массогабаритных и технико-экономических характеристик за счет размещением обмоток только на крайних стержнях магнітопровода, со свободным центральным стержнем.

ВВЕДЕНИЕ

На промышленных предприятиях, корабельных и береговых установках, в системах вентиляции зданий и оборудования, насосных станциях и на других технических объектах находят широкое применение различные схемы выпрямления [1], от которых питаются частотно регулируемые электроприводы.

Эти схемы выпрямления генерируют в сеть высшие гармоники тока, искажающие синусоидальную форму кривой тока и напряжения сети [1–5]. Высшие гармоники тока в питающей сети становятся причиной выхода из строя электротехнического и электронного оборудования, вычислительной техники, перегрева роторов и ускоренного износа подшипников электродвигателей и генераторов, аварий в системах управления электроприводов, взрывов электролитических конденсаторов, ложных отключений защиты электрооборудования, быстрого старения изоляции и перегорания электроосветительных приборов и других негативных последствий.

Разработкой методов подавления высших гармоник тока занимаются ученые и специалисты во всех промышленно развитых странах [1–16]. Однако практическое применение устройств подавления высших гармоник тока (УПВГТ) в Украине пока единично.

На протяжении 14 лет в Северной Америке действует стандарт [17], обязывающий потребителей электроэнергии принимать меры к подавлению высших гармоник тока. В странах Европейского Союза в течение последних лет также внедрены междуна-

рные стандарты EN 61000-2-2, EN 61000-3-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-4 и др., в которых регламентированы предельные уровни эмиссии гармоник тока для различного электрооборудования в системах промышленного и коммунального электроснабжения [18]. В действующем же в Украине Межгосударственном Стандарте 13109-97 "Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения" эти проблемы не затронуты.

Снижать уровень высших гармоник тока можно "активными" и "пассивными" устройствами. Однако "активные" устройства дороги, сложны и не всегда надежны. Поэтому основное внимание уделяется "пассивным" устройствам. В основном это фильтры высших гармоник тока [3, 15, 16, 19] и УПВГТ трансформаторного и автотрансформаторного типа [1–5, 9, 10, 14–16]. Достоинством данного оборудования является его надежность, отсутствие или минимальная генерация в сеть реактивной мощности, которая отрицательно влияет на работу сетей. Поэтому работа по усовершенствованию существующих, и разработка новых УПВГТ актуальна.

Целью статьи является описание и сравнительный анализ разработанных новых фазосдвигающих автотрансформаторных УПВГТ [20], являющихся аналогами наиболее распространенному автотрансформаторному УПВГТ "гексагонального" типа [2], и работающих в трехфазных электрических сетях без нулевого провода с мощными 12-пульсными выпрямителями.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ТРАДИЦИОННЫХ И НОВЫХ СХЕМ УПВГТ

Классический УПВГТ "гексагонального" типа [2], работающий в трехфазных электрических сетях без нулевого провода с 12-пульсными выпрямителями представляет собой многообмоточный автотрансформатор, обмотки которого соединены таким образом, чтобы подавить высшие гармоники тока за счет их сдвига по фазе и взаимной компенсации этих гармоник. Схема соединения обмоток и векторная диаграмма напряжений названного устройства показаны на рис. 1, *a* и *b*.

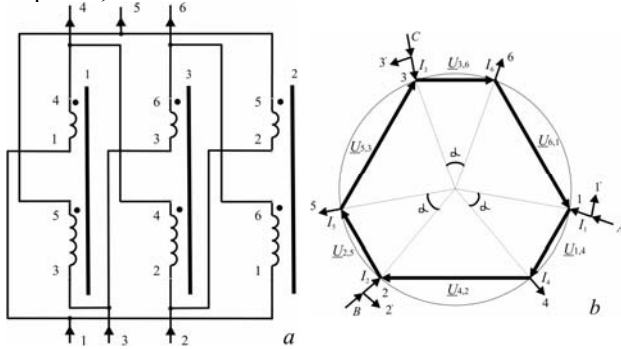


Рис. 1. Схема соединения *a* и векторная диаграмма напряжений *b* обмоток автотрансформаторного УПВГТ типа "гексагон"

Автотрансформатор на рис. 1 содержит один ввод и один вывод для каждой из фаз и обеспечивает электрический угол сдвига между векторами входного и выходного напряжения $\alpha = 30^\circ$. Автотрансформатор имеет трехстержневой магнитопровод, на двух крайних 1 и 2 и одном центральном 3 стержнях которого расположены по две обмотки – "короткая" и "длинная", намотанные в одном направлении винтовой линии. Каждая "короткая" обмотка содержит количество витков в $\sin(\alpha/2)/\sin(60^\circ - \alpha/2)$ меньше количества витков каждой "длинной" обмотки. Обмотки на стержнях магнитопровода обозначены так: 4,1 и 5,3 – "короткая" и "длинная" обмотки на крайнем стержне 1, на векторной диаграмме напряжений им соответствуют "короткий" вектор $\underline{U}_{1,4}$ и "длинный" вектор $\underline{U}_{5,3}$; 5,2 и 6,1 – "короткая" и "длинная" обмотки на крайнем стержне 2, на векторной диаграмме напряжений им соответствуют "короткий" вектор $\underline{U}_{2,5}$ и "длинный" вектор $\underline{U}_{6,1}$; 6,3 и 4,2 – "короткая" и "длинная" обмотки на центральном стержне 2, на векторной диаграмме напряжений им соответствуют "короткий" вектор $\underline{U}_{3,6}$ и "длинный" вектор $\underline{U}_{4,2}$. Точками на схеме рис. 1, *a* отмечены начала обмоток.

Векторная диаграмма напряжения обмоток устройства образует гексагональную схему соединения векторов, см. рис. 1, *b*, откуда и возникло название данного УПВГТ. Три вершины гексагона, соответствующие фазам *A*, *B*, и *C*, являются вводами схемы – 1, 2, 3, а остальные три вершины являются выводами схемы – 4, 5, 6.

УПВГТ подавляет гармоники тока с номерами 5, 7, 17, 19 и т.д.

Подключается УПВГТ к 12-пульсной схеме, показанной на рис. 2. На рисунке изображены два трехфазных выпрямительных моста с входами 1', 2', 3', к которым подключаются соответствующие вводы устройства 1', 2', 3' и входами 4, 5, 6, к которым подсоединяются соответствующие выводы устройства 4, 5,

6, уравнивающий реактор *L* с бифилярно намотанными обмотками, реактор L_0 , батарея конденсаторов *C* и нагрузка Z_n .

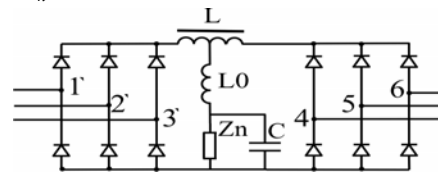


Рис. 2. Схема 12-пульсного выпрямителя, состоящего из двух параллельно включенных схем Ларионова

Таким образом, из одного питающего трехфазного напряжения сети, при помощи рассмотренного трехфазного автотрансформаторного фазосдвигающего УПВГТ, образуются две трехфазные системы напряжения, сдвинутые между собой на электрический угол α (оптимальная величина этого угла равна 30°). При этом в каждой трехфазной системе фазные напряжения одинаковы между собой по величине и сдвинуты друг относительно друга на 120 электрических градусов.

Рассмотрим новые разработанные конструкции УПВГТ, являющиеся аналогами рассмотренного выше "гексагона" [20].

Проанализировав векторную диаграмму напряжений "гексагона" на рис. 1, *b*, авторы пришли к выводу, что в такой схеме можно исключить "длинный" вектор $\underline{U}_{4,2}$, заменив его двумя "длинными" векторами $\underline{U}_{4,7}$ и $\underline{U}_{7,2}$, являющихся соответственно продолжением векторов $\underline{U}_{1,4}$ и $\underline{U}_{2,5}$, см. рис. 3, *b*, и исключить "короткий" вектор $\underline{U}_{3,6}$, заменив его двумя "короткими" векторами $\underline{U}_{3,8}$ и $\underline{U}_{8,6}$, являющихся продолжением векторов $\underline{U}_{5,3}$ и $\underline{U}_{6,1}$. При такой замене указанных векторов, векторами, соединенными по схеме "открытого треугольника", векторная диаграмма напряжений принимает форму ромба. То есть, убираются обмотки 6,3 и 4,2 с центрального стержня магнитопровода и добавляются "длинная" обмотка 7,4 и "короткая" обмотка 3,8 на крайний стержень 1, и "длинная" обмотка 2,7 и "короткая" обмотка 8,6 на крайний стержень 2. При этом обмотки 7,4 и 2,7, а также обмотки 3,8 и 8,6 соединяются по схеме "открытого треугольника".

Устройство на рис. 3 получило название УПВГТ типа "ромб" и имеет по две пары "коротких" и "длинных" обмоток на каждом стержне магнитопровода, то есть по четыре обмотки на стержне, а всего – восемь обмоток, см. рис. 3, *b*.

Система обмоток магнитно уравновешена. Сумма ампервитков обмоток 4,1 и 5,3 равна нулю. То же самое можно сказать о парах обмоток 5,2 и 6,1; 3,8 и 7,4; 8,6 и 2,7. Это основное свойство автотрансформаторов данного типа [2, 4].

Заметим, что вводы и выводы на векторной диаграмме "ромба" остались на тех же местах, что и на векторной диаграмме "гексагона". То есть устройства совместимы друг с другом и взаимно заменяемы.

Одна из возможных конструкций полученного трехфазного автотрансформаторного фазосдвигающего УПВГТ представлена на рис. 4. На рисунке даны обозначения: 1 – магнитопровод; 2, 3 – катушками с обмотками на крайних стержнях магнитопровода. Центральный стержень магнитопровода остается свободным. Такое расположение катушек применяется для трехфазно-двухфазного трансформатора, собранного по схеме "открытого" треугольника [1].

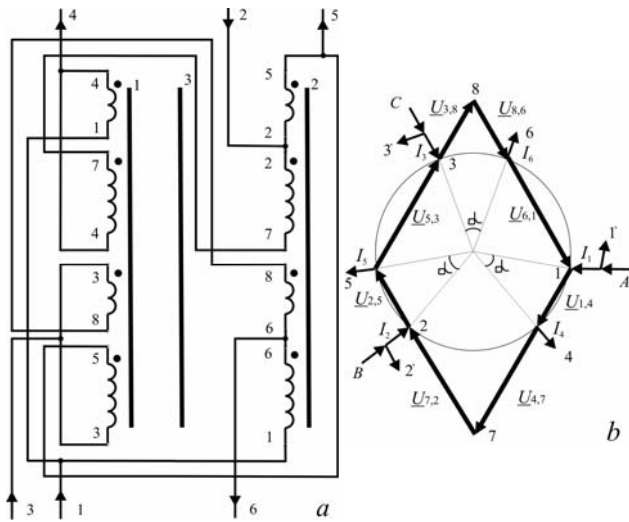


Рис. 3. Схема соединения *a* и векторная диаграмма напряжений обмоток *b* нового автотрансформаторного УПВГТ типа "ромб"

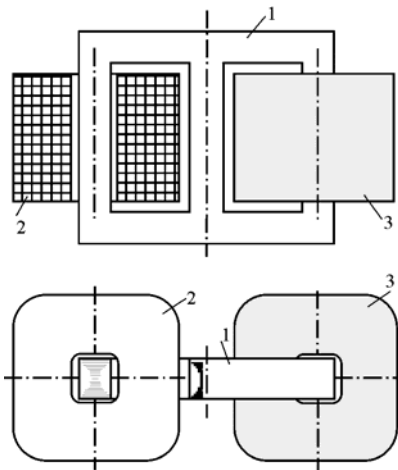


Рис. 4. Конструкция трехфазного автотрансформаторного фазосдвигающего УПВГТ с катушками с обмотками на крайних стержнях магнитопровода, со свободным центральным стержнем

Подобная конструкция имеет улучшенную технологию изготовления и условий охлаждения, уменьшенную массу магнитной системы и обмоток, и, как следствие, улучшенные технико-экономические показатели за счет свободного от обмоток центрально стержня магнитопровода.

Некоторое увеличение установленной мощности УПВГТ полностью компенсируется возможностью увеличения плотности тока в обмотках и магнитной индукции в магнитопроводе вследствие значительно лучших условий охлаждения (отсутствует наиболее нагреваемая средняя катушка).

Для получения еще одной модификации схемы, приведенной на рис. 5, изменим порядок соединения в обмотках "открытых треугольников" соответственно на участках с узлами 4, 2 и 3, 6 на рис. 3 (см. расположение векторов напряжений $\underline{U}_{4,7}$ и $\underline{U}_{7,2}$, и векторов $\underline{U}_{3,8}$ и $\underline{U}_{8,6}$ на рис. 3, *b* и расположение векторов напряжений $\underline{U}_{4,7}$ и $\underline{U}_{7,2}$, и векторов $\underline{U}_{3,7}$ и $\underline{U}_{7,6}$ на рис. 5, *b*).

На векторных диаграммах напряжений точки 7 и 8 на рис. 3, *b* совмещаются в точке 7 на рис. 5, *b*, поскольку имеют одинаковый электрический потенциал напряжений из-за своего симметричного расположе-

ния относительно центра ромба. Следовательно, эти точки можно гальванически соединить друг с другом на схеме рис. 5, образуя точку пересечения 7.

Схема соединения обмоток нового устройства показана на рис. 5, *a*. Полученная схема будет являться модификацией схемы "ромба" и полностью с ней совместима. Устройство получило название УПВГТ типа "флаги".

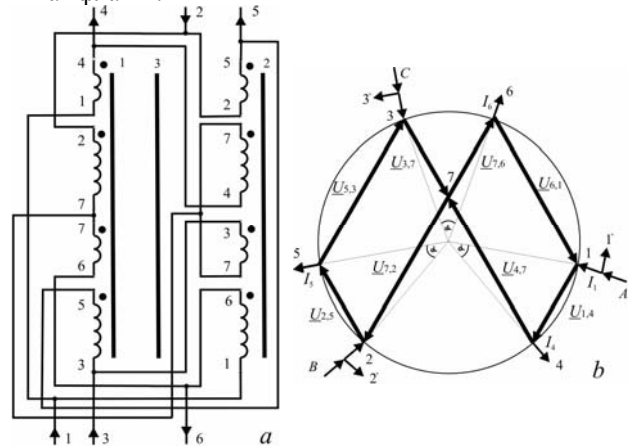


Рис. 5. Схема соединения *a* и векторная диаграмма напряжений обмоток *b* нового автотрансформаторного УПВГТ типа "флаги"

Система обмоток автотрансформатора на рис. 5 также магнитно уравновешена. Сумма ампервитков обмоток 4,1 и 5,3 равна нулю. То же относится и к парам обмоток 7,6 и 2,7; 5,2 и 6,1; 3,7 и 7,4.

Новые трехфазные фазосдвигающие автотрансформаторные УПВГТ на рис. 3 и 5 могут обеспечивать любой заданный электрический угол сдвига α в диапазоне от 0° до 120° между векторами входного и выходного напряжения, но оптимальным значением, так же как и в "гексагоне", является угол $\alpha = 30^\circ$. Количество витков "длинных" обмоток соотносится с количеством витков "коротких" обмоток как $\sin(\alpha/2)/\sin(60^\circ - \alpha/2)$. Устройства имеют три ввода 1, 2, 3 и три вывода 4, 5, 6.

Устройства работают таким образом. Вводы устройств 1, 2, 3 подключаются к сети трехфазного переменного электрического тока. При этом по обмоткам текут токи. Обусловленные этими токами магнитодвижущие силы создают в магнитопроводе устройства переменные магнитные потоки. Магнитные потоки от каждой из обмоток, проходят через три стержня магнитопровода и два его ярма и сцепляются со всеми обмотками устройства. Магнитные потоки, в соответствии с законом электромагнитной индукции, наводят во всех обмотках электродвижущие силы самоиндукции и взаимной индукции. На выводах устройства 4, 5, 6 получаем напряжения, которые сдвинуты по фазе относительно входных напряжений на угол α . Векторы 5-ой гармоники образуют обратную последовательность чередования фаз, а векторы 7-ой гармоники – прямую.

При предложенном соединении обмоток векторы напряжений каждой фазы расщепляются на векторы, смещенные один относительно другого на 30 электрических градусов. Векторы 5-ой и 7-ой гармоник токов фаз второго моста, подключенного к УПВГТ, сдвигаются на определенный угол и, проникая в первичную сеть, взаимно компенсируются с токами перво-

го выпрямительного моста. То же происходит с 17-ой и 19-ой гармониками и т.д. То есть, рассматриваемые схемы УПВГТ типа "ромб" и "флаги", также как и УПВГТ типа "гексагон", подавляют гармоники с номерами $6 \cdot (2 \cdot m - 1) \pm 1$ и $6 \cdot (2 \cdot m - 2) \pm 1$, где $m = 1, 2, 3, \dots$. Не подавляются гармоники 11, 13 и т.д. При этом от высших гармоник освобождаются не токи обмоток автотрансформатора устройства, а линейные токи сети питания.

Для расчета таких устройств можно использовать оптимизационную модель трехфазного многообмоточного автотрансформатора со свободным центральным стержнем магнитопровода из работы [21].

Применяя законы Кирхгофа и закон равновесия магнитодвижущих сил, и пренебрегая током намагничивания, можно показать, что действующие значения входных I_1, I_2, I_3 и выходных I_4, I_5, I_6 токов для всех рассматриваемых автотрансформаторов одинаковы и равны:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = \frac{I_n \cdot \sqrt{2/3}}{2}, \quad (1)$$

где I_n – усредненное действующее значение тока на входе одного выпрямителя.

Действующие значения напряжений на "длинных" U_d и "коротких" U_k обмотках для всех рассматриваемых автотрансформаторов рассчитываются по формулам:

$$U_d(\alpha) = 2 \cdot U_m \cdot \sin(60^\circ - \alpha/2); \quad (2)$$

$$U_k(\alpha) = 2 \cdot U_m \cdot \sin(\alpha/2). \quad (3)$$

Здесь U_m – амплитудное значение фазного напряжения.

Для автотрансформатора "гексагон", см. рис. 1, b , действующие значения токов в его «длинных» обмотках $I_{d(I)}$ и в «коротких» обмотках $I_{k(I)}$ вычисляются по формулам:

$$I_{d(I)} = \frac{I_n}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad (4)$$

$$I_{k(I)} = I_{d(I)} \cdot \sin(60^\circ - \alpha/2) / \sin(\alpha/2), \quad (5)$$

а установочная мощность этого автотрансформатора определяется по формуле:

$$S_{(I)} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot I_{d(I)} \cdot U_d(\alpha). \quad (6)$$

Для автотрансформатора "ромб", см. рис. 3, действующие значения токов в "длинной" обмотке $I_{d(II)}$ определяются по формуле (4), в короткой обмотке $I_{k(II)}$, по выражению (5), а установочная мощность $S_{(II)}$, по уравнению:

$$S_{(II)} = 4 \cdot I_{d(I)} \cdot \frac{U_d(\alpha)}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Для автотрансформатора "флаги", см. рис. 5, действующие значения токов в длинной обмотке $I_{d(III)}$ определяется также по формуле (4), а в короткой обмотке $I_{k(III)}$, по формуле (5). Установочная мощность $S_{(III)}$ определяется по формуле (7).

На рис. 6 построены графики установленных мощностей S в зависимости от угла сдвига фаз α , отнесенных к мощности полной нагрузки P_n двух выпрямителей [4]:

$$P_n = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot U_m \cdot I_n. \quad (8)$$

Из графика видно, что при угле $\alpha = 30^\circ$ установленная мощность автотрансформаторов типа "ромб" и

"флаги" в 4/3 раза больше мощности "гексагона".

Однако, как уже было сказано, это полностью компенсируется возможностью увеличения плотности тока в обмотках и магнитной индукции в магнитопроводе. Помимо этого, эти автотрансформаторы технологичнее в изготовлении, поскольку имеют обмотки только на крайних стержнях магнитопровода.

По графику на рис. 6 можно так же приблизительно оценить установленные (типовые) мощности рассмотренных автотрансформаторов при различных значениях угла α . При $\alpha = 30^\circ$ установленная мощность новых УПВГТ составляет 0,29 от полной мощности нагрузки двух выпрямителей.

Следует также сказать о напряжениях между обмотками. Из векторных диаграмм видно, что максимальное напряжение между обмотками будет наблюдаться в "ромбе", оно в раз больше чем во всех остальных рассмотренных автотрансформаторах. Это требует повышенной изоляции между обмотками, а в тех случаях, когда указанные уравновешенные пары обмоток наматываются в этих УПВГТ бифилярно, то повышенной должна быть и межвитковая изоляция проводов.

На рис. 7 построена зависимость коэффициента гармоник тока THD_I (Total Harmonic Current Distortion) от угла α :

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{25} I_h^2 / I_1^2}. \quad (9)$$

где I_h, I_1 – действующие значения тока h -ой и 1-ой гармоник линейного тока сети.

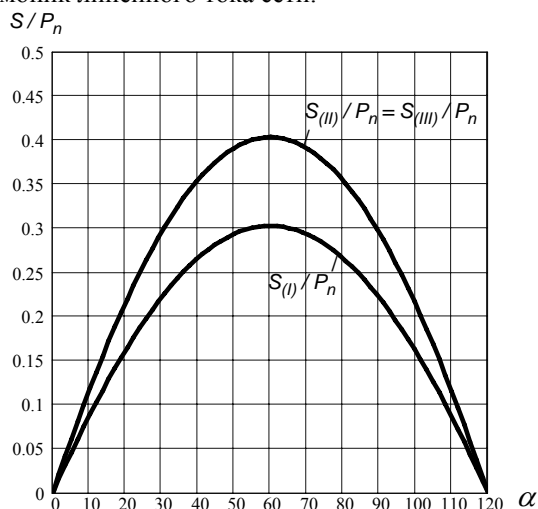


Рис. 6. Зависимость установочных мощностей автотрансформаторов, отнесенных к мощности нагрузки, от угла сдвига фаз

Зависимость THD_I от угла α в фазных токах сети с учетом гармоник до 25-й включительно (по нормам США и Канады) при применении данной схемы и в типичном случае, когда амплитуды гармоник в нагрузке пропорциональны их номерам, может быть рассчитана численными методами [4].

Из графика на рис. 7 следует, что оптимальным является угол $\alpha = 30^\circ$.

Сравнивая значение $THD_I = 0,133$ при $\alpha = 30^\circ$ с величиной $THD_I = 0,29$ при $\alpha = 0^\circ$, определяем, что применение новых типов УПВГТ в рассматриваемых случаях уменьшает THD_I в 2,184 раза.

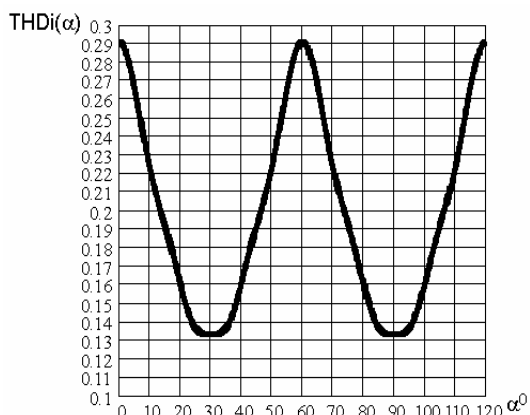


Рис. 7. Зависимость коэффициента гармоник тока от угла сдвига фаз

Зависимости на рис. 7 построены при отсутствии небаланса напряжений сети.

Из рассмотрения кривой на рис. 7 следует, что минимумы коэффициента THD_i наблюдаются при углах α равных 30° и 60° , либо очень близких к ним. То есть, в случае двух мостов, подключаемых на напряжения, сдвинутые на угол $\alpha = 30^\circ$, значения коэффициента THD_i минимальны.

Поэтому один мост нужно подключать напрямую к сети, а второй – через автотрансформатор, обеспечивающий угол сдвига фаз 30° . При этом, в случае отсутствия небаланса напряжений сети, коэффициент гармоник тока снижается до 13%.

ВЫВОДЫ

Разработанные новые фазосдвигающие автотрансформаторные устройства подавления высших гармоник тока могут быть использованы в трехфазных электрических сетях без нулевого провода при работе с 12-пульсными схемами выпрямителей для улучшения качества тока в сетях питания при подавлении гармоник тока с номерами 5, 7, 17, 19 и т.д.

Новая конструкция устройств обеспечивает улучшение массогабаритных и технико-экономических характеристик, по сравнению с существующим аналогом – автотрансформатором типа "гексагон". Задача была решена за счет размещением обмоток только на крайних стрижнях магнитопровода, со свободным центральным стрижнем. В результате существенно улучшается технология изготовления устройства, уменьшается масса магнитной системы и обмоток, улучшаются условия охлаждения, что позволяет увеличить плотность тока в обмотках и магнитную индукцию в магнитопроводе автотрансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и системы.– М.: Высшая школа, 1967.– 527 с.
 [2] Paice D.A. Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse methods for clean power. – NY: IEEE PREss, 1995.– 202 p.
 [3] Пути улучшения качества электроэнергии в корабельных и береговых электрических сетях и электроустановках / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар, Б.Б. Ларченко // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування.– Миколаїв: НУК, 2004.– № 3.– С. 60-70.
 [4] Пентегов И.В., Ларченко Б.Б. Особенности расчета электромагнитных процессов в гексагональных автотрансформаторных устройствах подавления высших

гармоник тока // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2, Енергетика.– Маріуполь: ПДТУ, 2005.– Вип. № 15.– С. 30-35.
 [5] Улучшение качества электроэнергии в электросетях с мощными 12-пульсными выпрямителями с помощью гексагональных автотрансформаторных устройств / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар, Б.Б. Ларченко // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2005.– С. 23-27.
 [6] Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях.– К.: Наукова думка, 1985.– 268 с.
 [7] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий.– М.: Энергоатомиздат, 1994.– 266 с.
 [8] Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов // Техническая электродинамика.– 1999.– № 4.– С. 21-26.
 [9] Пентегов И.В., Волков И.В., Levin М. Схемы подавления высших гармоник тока с расщеплением фаз на три составляющие и методы их расчета // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2002.– С. 71-78.
 [10] Пентегов И.В., Волков И.В., Levin М. Устройства подавления высших гармоник тока // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2002.– С. 13-22.
 [11] Barton T.H., Rectifiers. Cycloconverters and AC Controllers.– Oxford: Clarendon Press, 1994.– 670 p.
 [12] Blakey R.G. Power Electronics in Warships // Power Engineering Journal.– 1993.– April.– P. 65-70.
 [13] Ykema J.I. Protective Devices in Navy shipboard Electrical Power systems // Naval Engineers Journal.– 1988.– May.– P. 12-17.
 [14] Бамдас А.М., Кулинич В.А., Шапиро С.В. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз.– М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.– 208 с.
 [15] Улучшение качества электроэнергии в электросетях крупных административных зданий / М. Levin, И.В. Волков, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1.– К.: ІЕД НАНУ, 2004.– С. 93-98.
 [16] Улучшение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий посредством фильтров высших гармоник тока / И.В. Волков, М.Н. Курильчук, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Вісник Приазовського державного технічного університету. Зб. наук. праць. Ч. 2, Енергетика.– Маріуполь: ПДТУ, 2005.– Вип. № 15.– С. 15-19.
 [17] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power systems // IEEE standard 519.– 1992.
 [18] Жаркин А.Ф., Палачев С.А. Законодательное регулирование эмиссии высших гармоник тока в системах электроснабжения стран Евросоюза // Технічна електродинаміка.– 2005.– № 6.– С. 57-61.
 [19] Patent Us 6,127,743. Universal Harmonic Mitigating system / М. Levin (CA), I. Volkov (UA).– 10.03.2000.
 [20] Заявка А.с. 2006 02375 Україна, МПК H01F27/00. Трифазный автотрансформаторный фазосувний пристрій / И.В. Пентегов, И.В. Волков, С.В. Рымар, Б.Б. Ларченко (Україна (UA)), Міхаель Левін (Канада (CA)); ЧДТУ (UA).– № 19335/3; Заявл. 03.03.2006.
 [21] Рымар С.В. К вопросу оптимизации трехфазных и трехфазно-двухфазных многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов // Електротехніка і електромеханіка.– 2006.– № 1.– С. 47-50.

Поступила 30.08.2006