

УДК 621.314.6:621.316.15

СПЕКТР ТОКА ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ РАБОТЕ МОЩНОГО ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА АКТИВНУЮ НАГРУЗКУ

Николай Николаевич Беспалов, Юрий Анатольевич Катяев, Сергей Сергеевич Капитонов
ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»,
Российская Федерация, г. Саранск,
E-mail: bnn48@mail.ru ; kapss88@mail.ru ; ingeneer88@mail.ru ; тел. +7(834-2) 24-37-05,
430005, г. Саранск, ул. Богдана Хмельницкого, д. 39

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы формирования спектрального состава тока питающей сети при работе одного из типов статических преобразователей – мощного трехфазного мостового выпрямителя на основе мощных силовых полупроводниковых диодов с одинаковыми и различными величинами их параметров в состоянии высокой проводимости.

Ключевые слова: силовой полупроводниковый прибор; вольт-амперная характеристика; напряжение; ток; статический преобразователь; мощный трехфазный мостовой выпрямитель; спектральный состав тока.

I. ВВЕДЕНИЕ

При работе мощных полупроводниковых преобразователей в питающей сети возникает существенное расширение спектра гармоник тока. Одной из причин этого является то, что преобразование переменного напряжения синусоидальной формы питающей сети в выходное постоянное осуществляется с помощью нелинейных элементов – силовых полупроводниковых приборов (СПП). Расширение спектра питающего тока создает множество трудно решаемых проблем электромагнитной совместимости технических средств [1]. При производстве СПП наблюдается технологический разброс величин их параметров и характеристик. При применении СПП в преобразователях без специального подбора приборов обуславливает дополнительное существенное расширение спектрального состава тока питающей сети. Возможно появление в нем постоянной составляющей и дополнительных высших гармоник – как четных, так и нечетных [2]. Данная проблема привела к постановке задачи исследования, решение которой позволит выявить влияние некоторых параметров вольтамперной характеристики (ВАХ) СПП в состоянии высокой проводимости на спектр тока питающей сети.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей исследования являлся анализ спектрального состава питающего тока при работе мощного трехфазного мостового выпрямителя (МТМВ) на основе силовых диодов на активную нагрузку. Данное исследование проводилось путем моделирования спектра питающего тока при одинаковых и различных величинах параметров силовых диодов в состоянии высокой проводимости. В частности нужно было выявить зависимость величины постоянной составляющей питающего тока от величины разброса величин параметров диодов.

Выбор для исследования схемы МТМВ обусловлен ее очень широким применением в преобразовательной технике.

III. ТЕОРИЯ

Трехфазная мостовая схема выпрямления, представленная на рис. 1, содержит три источника синусоидального напряжения (U_a , U_b , U_c), шесть вентилях ($VD1 - VD6$) и нагрузочный резистор (R_n). В данной схеме источники соединены в звезду, а фазы их напряжений сдвинуты друг относительно друга на 120° . Три вентиля объединены в

анодную группу, а три других — в катодную. Общая точка катодов является положительным полюсом выпрямленного напряжения, общая точка анодов — отрицательным.

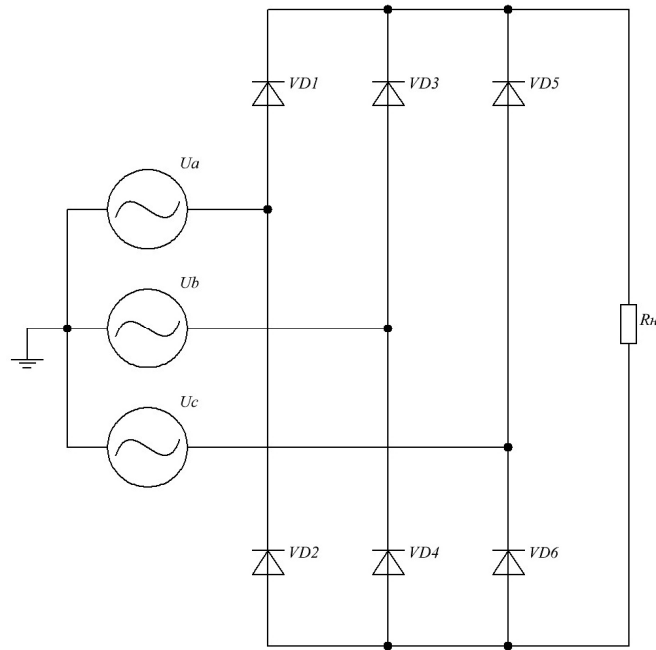


Рис. 1. Мостовая трехфазная схема выпрямления.

При работе схемы ток всегда проводят два вентиля: один в катодной группе, а другой — в анодной. В любой момент в катодной группе открыт тот вентиль, потенциал анода которого выше потенциалов анодов других вентилях в группе, а в анодной группе — вентиль, потенциал катода которого ниже потенциала катодов других вентилях в группе. Потенциал отсчитывается по отношению к нулевой точке соединения источников напряжения. Коммутация тока с одного вентиля на следующий в данной группе происходит в моменты, соответствующие взаимопересечениям синусоид фазных напряжений. Диаграммы напряжений трехфазного источника, а также тока фазы a (токи остальных фаз имеют аналогичную форму, но сдвинуты на 120°) представлены на рис. 2.

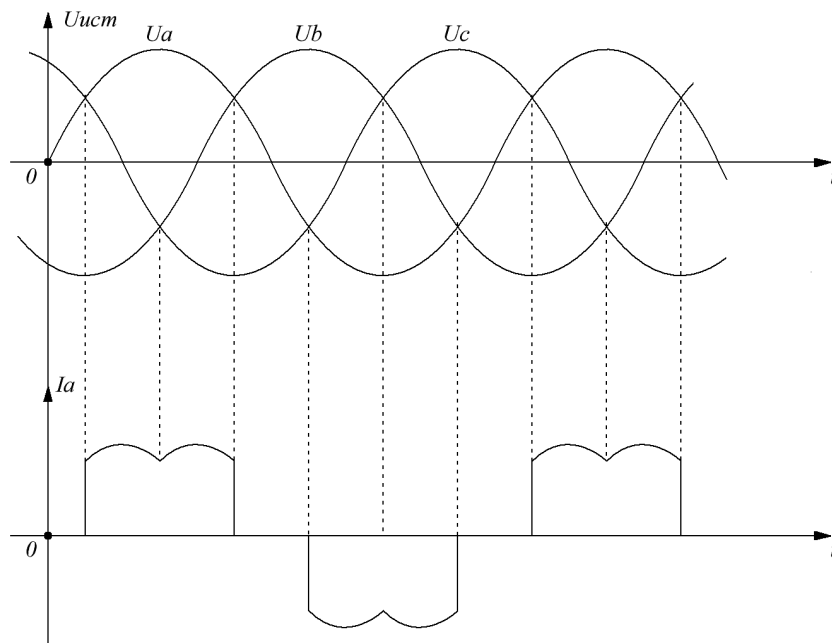


Рис. 2. Диаграмма напряжений трехфазного источника, а также тока фазы a .

Для расчёта схемы использована модель диода, которая основывается на кусочно-линейной аппроксимации вольтамперной характеристики (ВАХ) в прямом направлении. Модель состоит из резистора r_F эквивалентного дифференциальному сопротивлению реального диода и источника напряжения U_{F0} эквивалентного пороговому напряжению. Падение напряжения на модели диода описывается выражением:

$$u_{FVD} = U_{F0} + i_F r_F. \quad (1)$$

Каждый из вентиляй открыт в течение $1/3$ периода питающего напряжения, работая попеременно с двумя вентилями другой группы. Например, в промежуток времени $t_1 \dots t_2$ ($1/6$ часть периода) наибольшее положительное значение имеет напряжение фазы a , а наибольшее отрицательное – напряжение фазы b . Вследствие этого ток в цепи проходит от обмотки фазы a через вентиль $VD1$, через нагрузочный резистор R_d и через вентиль $VD4$ к обмотке фазы b . В момент t_2 наибольшее положительное напряжение имеет по-прежнему обмотка фазы a , а наибольшее отрицательное – обмотка фазы c . Поэтому ток переходит с вентиля $VD4$ на вентиль $VD6$ и далее до момента t_3 работают $VD1$ и $VD6$ и т. д. Таким образом, получается шесть контуров протекания тока разграниченных по времени.

Для примера рассмотрим контуры протекания тока для фазы a (рис.3). Получается четыре контура – два для положительной (от 0 до π) полуволны, и два – для отрицательной (от π до 2π).

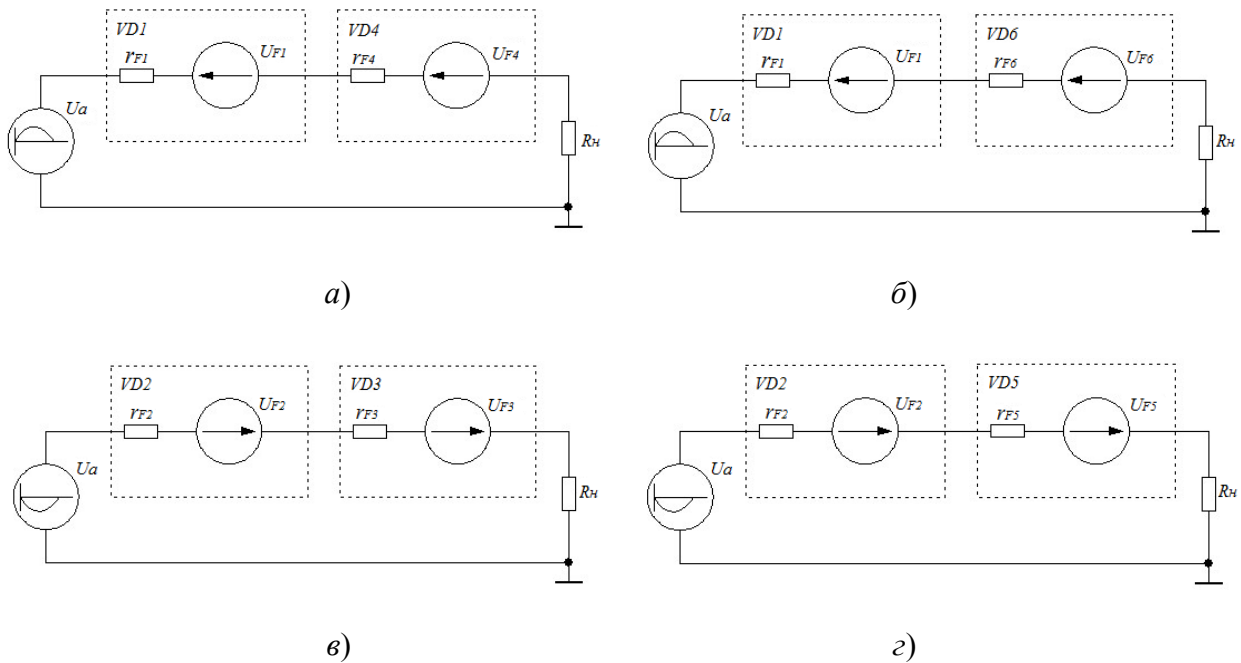


Рис. 3. Контур протекания тока положительного (a , $б$) и отрицательного ($в$, $г$) направлений фазы a .

Направление тока, напряжение питания и сопротивление нагрузки в контурах идентичны, следовательно, влиять на величину тока могут только элементы схемы замещения СПП.

Учитывая, что для расчета схемы использована модель диода на основе кусочно-линейной аппроксимации прямой ветви ВАХ, получим аппроксимированную форму контурных токов фазы a (рис. 4).

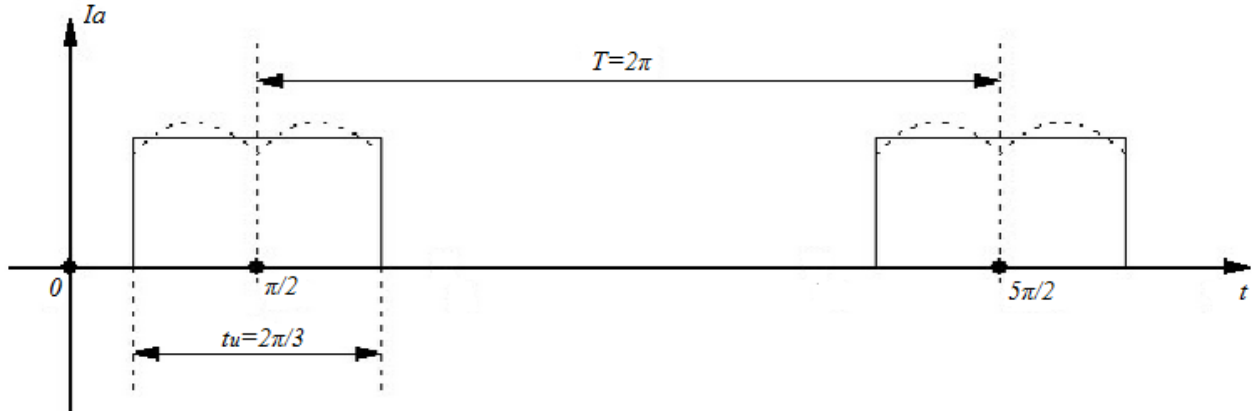


Рис. 4. Аппроксимированная форма тока контуров фазы a .

Таким образом, аппроксимированная форма тока представляет собой периодический сигнал прямоугольной формы с периодом T и длительностями импульсов t_u . Для получения математического представления спектра данного сигнала разложим его в ряд Фурье. При этом постоянная составляющая будет иметь вид:

$$I_{0I} = \frac{1}{3} \left(\frac{U_m - \sum_{n=1}^n U_{F0n}^-}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^- + R_j} - \frac{U_m - \sum_{n=1}^n U_{F0n}^+}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^+ + R_j} \right). \quad (2)$$

А формулы для вычисления гармоник представлены следующим образом: при $k=1$:

$$I_1 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{U_m - \sum_{n=1}^n U_{F0n}^+}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^+ + R_j} + \frac{U_m - \sum_{n=1}^n U_{F0n}^-}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^- + R_j} \right) \right)^2}, \quad (3)$$

при $k=3, 5, \dots, 39$:

$$I_k = \sqrt{\left(\frac{2}{k\pi} \left(\frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^+ + R_j} + \frac{\sum_{n=1}^n U_{F0n}^-}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^- + R_j} \right) \sin \frac{k\pi}{3} \right)^2}, \quad (4)$$

при $k=2, 4, \dots, 40$:

$$I_k = \sqrt{\left(\frac{2}{k\pi} \left(\frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^+ + R_j} - \frac{U_m}{\sum_{n=1}^n r_{Fn}^- + R_j} \right) \sin \frac{k\pi}{3} \right)^2}, \quad (5)$$

где: k – индекс, определяющий номер гармоники; U_{F0n} – пороговое напряжение диода; R_n – сопротивление нагрузки; r_F – дифференциальное сопротивление диода; n – индекс, определяющий количество силовых полупроводниковых ключей, входящих в состав цепи; U_m – амплитуда напряжения питания.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов была применена модель мощного силового диода Д183-6300 (паспортные данные – $U_{F0}=0,77$ В, $r_F=0,00004$ Ом). При этом выбрано напряжение питания $U_{II}=380$ В и сопротивление нагрузки $R_H=0,0295$ Ом.

Моделирование проводилось до сороковой гармоники, так как согласно ГОСТ Р 13109 – «Электромагнитная энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» гармонический состав тока ограничен сороковой гармоникой.

На рис.5. представлены кусочно-линейные аппроксимации прямой ветви ВАХ диодов VDI-VD6 МТМВ с одинаковыми величинами их параметров ($U_{F0}=0,77$ В, $r_F=0,00004$ Ом).



Рис. 5. ВАХ VDI-VD6 с одинаковыми величинами параметров U_{F0} , r_F .

Спектр входного тока в симметричном режиме представлен на рис. 6.

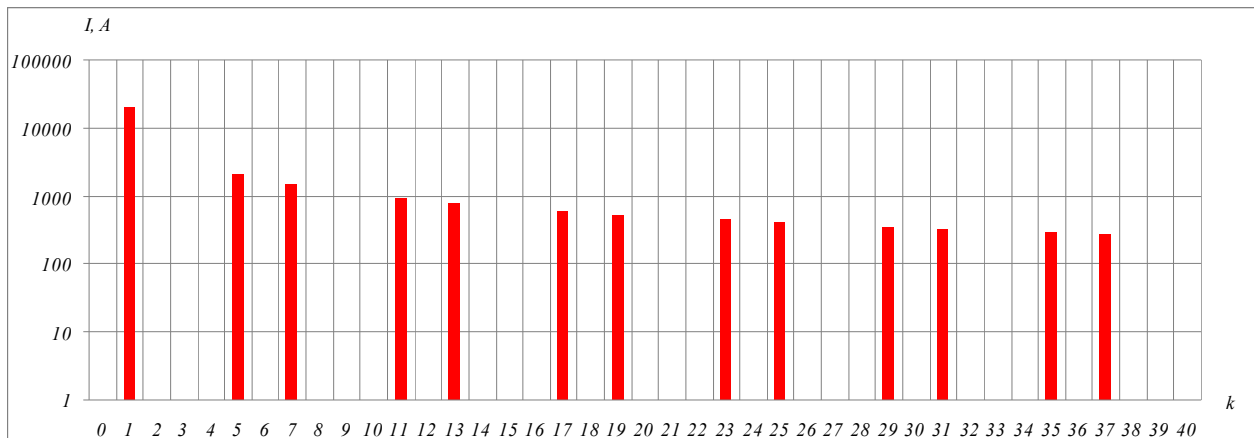


Рис. 6. Спектр входного тока МТМВ при одинаковых значениях параметров СПП в прямом направлении.

На рис.7. представлены кусочно-линейные аппроксимации прямой ветви ВАХ диодов $VD1-V D6$ МТМВ с различными величинами их параметров U_{F0} , r_F . При этом разброс величин их параметров был принят следующим: +20% для диодов $VD1$, $VD3$, $VD5$ ($U_{F0}=0,924$ В, $r_F=0,000048$ Ом), и -20% для $VD2$, $VD4$, $VD6$ ($U_{F0}=0,616$ В, $r_F=0,000032$ Ом).

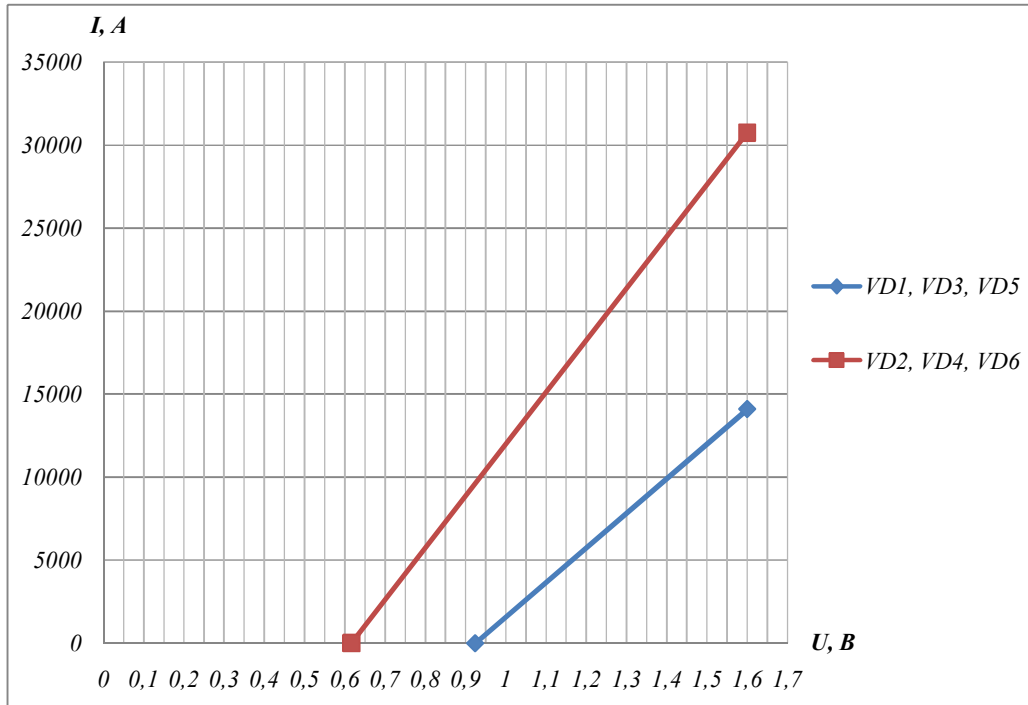


Рис.7. ВАХ $VD1-V D6$ с различными величинами параметров U_{F0} , r_F .

Спектр входного тока при различных значениях параметров (U_{F0} , r_F) диодов $VD1-V D6$ МТМВ изображен на рис. 8.

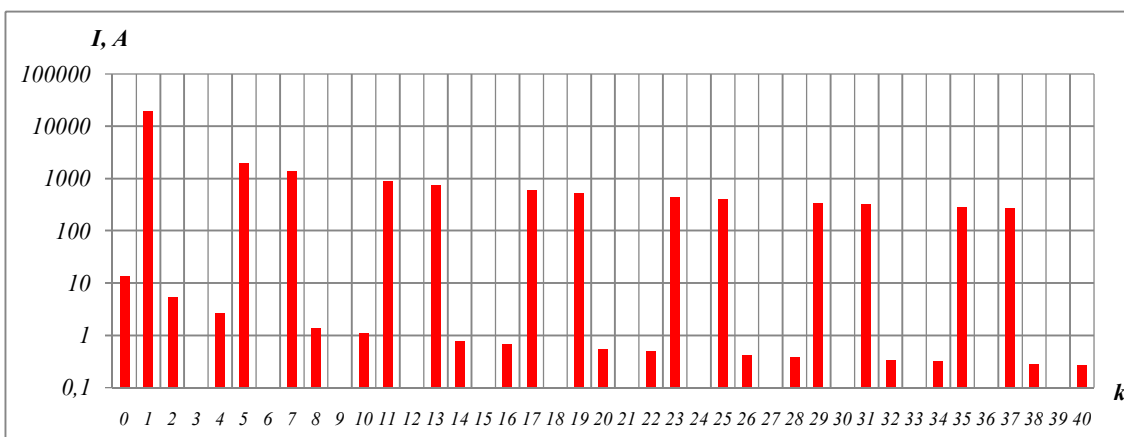


Рис. 8. Спектр входного тока МТМВ при различных значениях параметров СПП в прямом направлении.

На рис. 9 приведены графики зависимости величины постоянной составляющей тока I_0 от разброса величин параметров диодов $VD1-V D6$.

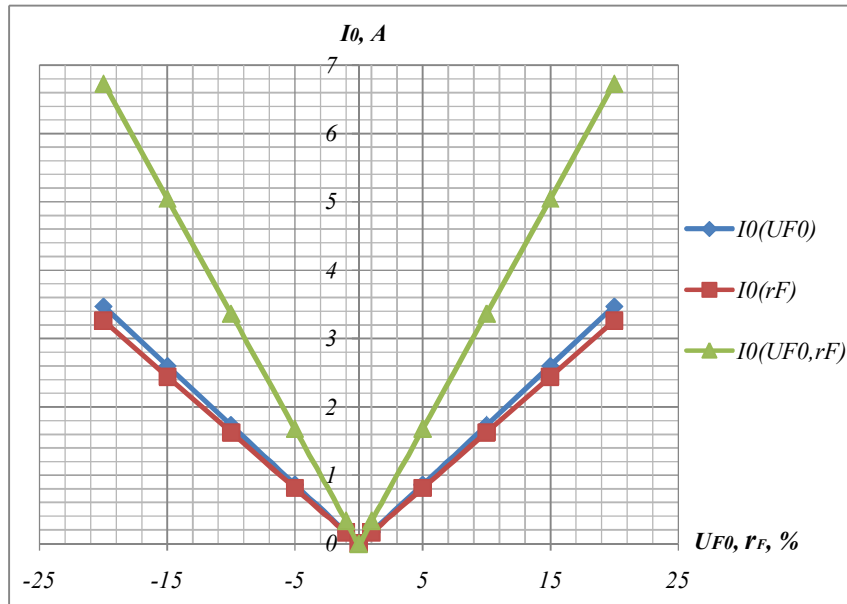


Рис. 9. Зависимость постоянной составляющей тока I_0 от разброса величин параметров диодов VD1-VD6.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При одинаковых значениях величин параметров (U_{F0} , r_F) прямой ветви ВАХ диодов VD1-VD6 МТМВ наблюдается симметрия формы протекания тока в положительном и отрицательном направлениях. При этом спектр входного тока в симметричном режиме (рис. 6) имеет в своем составе первую ($I_1=19,87 \text{ кА}$) и высшие нечетные гармоники. Следует отметить, что в данном спектре отсутствуют гармоники, кратные трем. Действительно, поскольку период 3-й гармоники в три раза меньше периода 1-й гармоники, то составляющие 3-й гармоники в отдельных фазах трехфазных сетей совпадают по фазе или образуют систему нулевой последовательности. Аналогично гармоники с $k = 2, 5, 8, \dots = 3n - 1$ (n — целое число) образуют симметричные системы обратной последовательности, а гармоники порядка $k = 1, 4, 7, 10, \dots = 3n + 1$ (n — целое число) — системы прямой последовательности. Это определяет особый характер действия гармоник различного порядка в трехфазных цепях.

При различных значениях параметров (U_{F0} , r_F) прямой ветви ВАХ диодов VD1-VD6 МТМВ наблюдается несимметричность формы протекания тока в положительном и отрицательном направлениях. Это обуславливает появление существенно по величине постоянной составляющей ($I_0=13,45 \text{ А}$). При этом спектр данного тока (рис. 8) содержит в своем составе не только первую, но и высшие четные и нечетные гармоники (кроме гармоник, кратных трем). Однако следует отметить, что амплитуды четных гармоник по сравнению с амплитудами нечетных достаточно малы.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассматриваемой схеме МТМВ с активной нагрузкой нелинейность ВАХ силовых диодов в составе выпрямителя оказывает отрицательное влияние на форму тока питающей сети, приводя его к несинусоидальному виду. Вследствие чего, расширяется спектральный состав тока сети с появлением в его составе нулевой и высших гармоник.

При этом, если величины параметров (U_{F0} , r_F) прямой ветви ВАХ всех диодов одинаковы, то наблюдается симметрия формы протекания тока в положительном и отрицательном направлениях. В этом случае, спектр состоит из первой и высших нечетных

гармоник (кроме гармоник, кратных трем). В результате чего, в данном случае, отсутствует вредное явление вынужденного намагничивания магнитопровода сетевого трансформатора, так как постоянная составляющая тока отсутствует, а каждая из вторичных обмоток трансформатора проводит ток как в течении $1/3$ положительной полуволны, так и в течении $1/3$ отрицательной полуволны (магнитные потоки, создаваемые этими токами в каждом стержне, компенсируются).

Но различия в параметрах (U_{F0} , r_F) прямой ветви ВАХ диодов приводит к возникновению несимметрии формы питающего тока. Следствием чего является появление в составе спектра постоянной составляющей и высших четных гармоник. При высокой нагрузке, когда ток каждой фазы достигает нескольких десятков kA , проявление данной несимметрии может оказывать существенное отрицательное влияние на работу трансформатора. В частности, появление постоянной составляющей в составе тока приводит к эффекту вынужденного подмагничивания трансформатора, а также дополнительных электрических потерь.

Снижение величины постоянной составляющей при таких токах в нагрузке можно обеспечить подбором приборов с идентичными величинами параметров (U_{F0} , r_F) прямой ветви ВАХ диодов.

Список литературы

- 1 ГОСТ Р 13109 — «Электромагнитная энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – М. : Издательство стандартов, 1999. – 36 с.
- 2 Беспалов Н. Н. О спектре тока в питающей сети работе мощного однофазного мостового выпрямителя на активную нагрузку / Н. Н. Беспалов, А. М. Романов // Электроника и информационные технологии. 2010. Вып. 2 (9). URL: <http://fetmag.mrsu.ru>.

SPECTRUM OF THE CURRENT OF THE POWER LINE AT WORK OF THE POWERFUL THREE-PHASE BRIDGE RECTIFIER ON ACTIVE LOADING

Nikolay Nikolaevich Bepalov, Sergey Sergeevich Kapitonov, Yuri Anatolievich Katyaev
Mordovian N. P. Ogarev state university,
Russian Federation, Saransk city

E-mail: bnn48@mail.ru ; kapss88@mail.ru ; ingeneer88@mail.ru ; tel.: +7(834-2) 24-37-05,
39, Bohdan Khmelnytsky street, room 526, 433005, Saransk, Mordovia, Russia

Annotation: In article questions of formation of spectral structure of a current of a power line are considered at work of one of types of static converters – the powerful three-phase bridge rectifier on the basis of powerful power semi-conductor diodes with identical and various sizes of their parameters in a condition of high conductivity.

Key words: the power semi-conductor device, volt-ampernaja the characteristic, pressure, a current, the static converter, the powerful three-phase bridge rectifier, spectral structure of a current.



Николай Николаевич Беспалов
Россия, РМ, г. Саранск
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
E-mail: bnn48@mail.ru
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил радиотехнический факультет Новосибирского электротехнического института (1974). Кандидат технических наук (2000). Заведующий кафедрой автоматики (с 2003 г. по настоящее время).

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик; разработка методов и аппаратуры для ионизации воздушной среды.



Сергей Сергеевич Капитонов
Россия, РМ, г. Саранск
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
E-mail: kapss88@mail.ru.
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва (2010). Аспирант кафедры автоматики факультета электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва.

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик; разработка методов и аппаратуры для ионизации воздушной среды.



Юрий Анатольевич Катяев
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
E-mail: ingeneer88@mail.ru.
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва (2010).

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик.