

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Карасев А. В., Смирнов В. М.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск

E-mail: a1k@list.ru

Аннотация. В статье рассматриваются принципы построения систем управления трехфазными выпрямителями с коррекцией коэффициента мощности на IGBT транзисторах, их математическая модель и результаты моделирования

Ключевые слова. Выпрямитель, коэффициент мощности, система управления, математическая модель

Введенные в последние годы международные и государственные стандарты жестко ограничивают эмиссию в сеть высших гармоник тока и создаваемые преобразователями искажения напряжения сети. Появление мощных высокочастотных полностью управляемых ключей позволило решать задачу электромагнитной совместимости с использованием коммутации ключей на высокой частоте и подавлением паразитных гармоник дросселями с небольшой индуктивностью. Такие установки получили название преобразователей с активной коррекцией коэффициента мощности или корректоров коэффициента мощности (ККМ).

Среди трехфазных преобразователей с ККМ наибольшее распространение получил так выпрямитель, реализуемый на базе трехфазного инвертора напряжения и функционирующий как в инверторном, так и в обратимом (выпрямительном) режимах (рис.1).

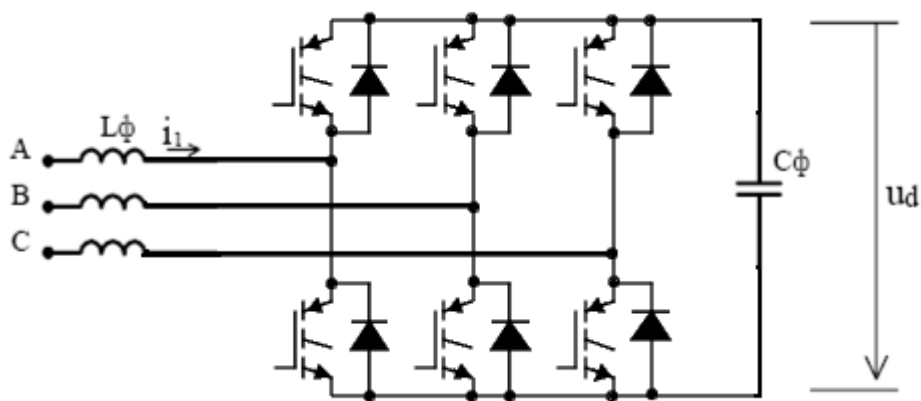


Рис.1 – Типовая схема выпрямителя на базе IGBT транзисторов

Электромагнитные процессы в силовой части выпрямителя не имеют существенных отличий от работы инвертора напряжения в традиционном (инверторном) режиме. В значительной меньшей степени исследованы проблемы управления трехфазным ККМ, в частности способы формирования сетевого тока заданной формы и фазы. В трехфазных преобразователях, подключенных к сети без нулевого провода, наблюдается влияние процессов в других фазах на формирование фазного сетевого тока, которое может вызвать сбои в работе замкнутой системы управления. Решение указанной проблемы имеет свою специфику, особенно при питании от неидеальной сети с искажениями.

Для исследования особенностей управления использовано математическое моделирование в среде Matlab Simulink (Mathworks Inc). Входящий в состав Simulink модуль SimPowerSystems, является специализированным приложением для моделирования устройств силовой электронной техники. Достоинством Simulink является то, что сложные электротех-

нические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, модель силовой схемы можно выполнить с использованием имитационных блоков, а системы управления - с помощью математических блоков, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель и скорость ее работы.

ККМ могут функционировать с постоянной частотой коммутации (синхронное управление) либо с переменной частотой коммутации (асинхронное управление).

Асинхронные системы управления используют двухпозиционное слежение за током сети по имеющемуся задающему сетевому напряжению, когда коммутация в силовой схеме осуществляется при отклонении сетевого тока от заданного значения на величину $\pm \Delta i$. Применение таких систем управления в трехфазных ККМ, подключенных к сети без нулевого провода, ограничено в связи с наличием трех проблем:

- 1) лишь два фазных сетевых тока из трех являются независимым, поэтому введение обратной связи по трем токовым каналам чревато сбоями в работе системы управления;
- 2) отмечается эффект потери управляемости, когда наблюдается выход мгновенного значения пульсаций фазного тока за пределы, задаваемые шириной петли гистерезиса релейного элемента;
- 3) сетевые напряжения часто искажены и несимметричны, что затрудняет синхронизацию с ними.

Синхронные системы управления с постоянной частотой модуляции имеют проблемы определения фазового сдвига при переменной нагрузке и синхронизации с искаженной сетью.

Наиболее предпочтительным, выглядит создание синхронной системы управления трехфазными ККМ с замкнутым контуром по обобщенному вектору тока. Упрощенная структурная схема системы управления трехфазным ККМ показана на рис.2. Функционально система управления ККМ разделена на две подсистемы. Задачей первой является вычисление значений активной и реактивной составляющих мощности, которые преобразователь потребляет из сети. Задачей второй подсистемы является управление переключением ключевых элементов преобразователя напряжения для создания заданного потока мощности и фазы тока.

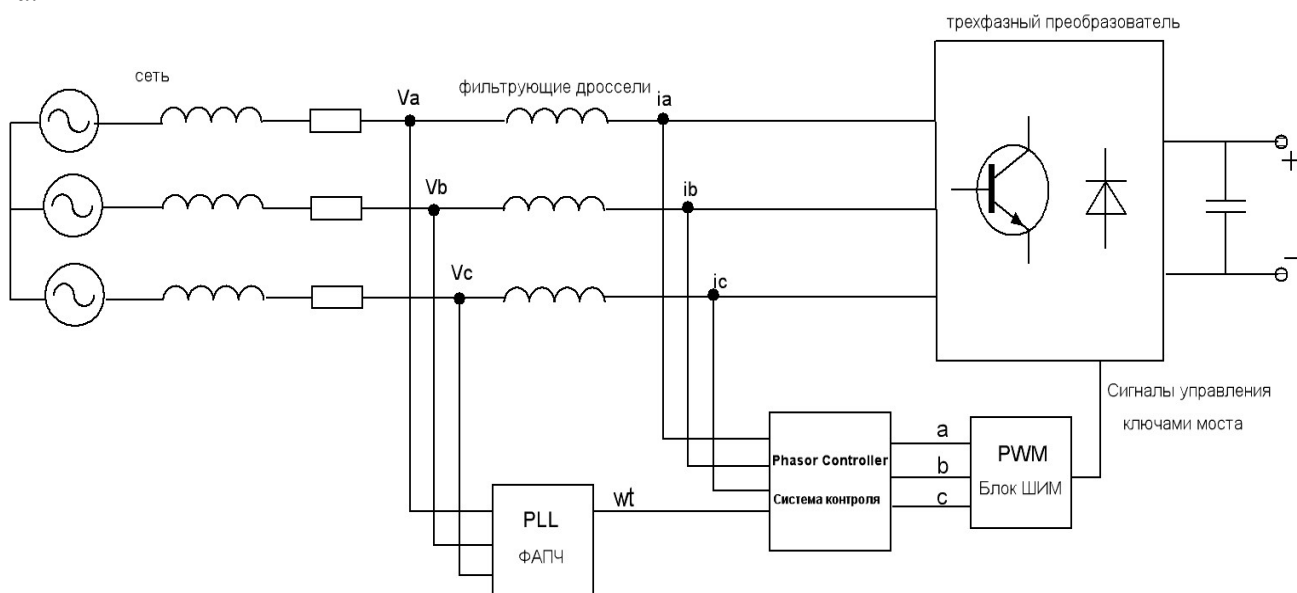


Рис.2 – Структурная схема системы управления ККМ

Возможность регулирования реактивной составляющей мощности, потребляемой преобразователем из сети, появляется при использовании метода «мгновенной мощности».

Метод «мгновенной мощности» основан на вычислении мощности преобразователя с использованием сетевых токов и напряжений в стационарной ортогональной системе координат. Переход к этой системе координат от трехфазной системы координат осуществляется посредством преобразования Кларка ($abc-\alpha\beta$ преобразование):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

где $i_\alpha(t)$ и $i_\beta(t)$ - проекции пространственного вектора тока на оси двухфазной стационарной системы координат, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ - проекции пространственного вектора тока на оси трёхфазной системы координат.

Вводятся понятия действительной $p(t)$ и мнимой $q(t)$ мгновенных мощностей в $\alpha - \beta$ координатах:

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha(t) & u_\beta(t) \\ -u_\alpha(t) & u_\beta(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}; \quad (2)$$

Среднее значение действительной составляющей мгновенной мощности $p(t)$ соответствует активной мощности в традиционном представлении. В то же время, мнимая мгновенная мощность $q(t)$ не соответствует традиционной реактивной мощности. Поскольку составляющие мгновенных мощностей p и q , соответствующие активной и реактивной мощности, являются величинами постоянными (или медленно меняющимися в динамических режимах работы), то упрощается их выделение посредством фильтров низких частот (ФНЧ) с минимальной фазовой задержкой.

Возможность оперирования непосредственно активными и реактивными составляющими тока и напряжения, а не некими мгновенными мощностями, появляется при использовании метода управления в синхронной системе координат. Метод основан на прямом и обратном преобразовании Парка-Горева. Прямое преобразование заключается в нахождении проекций обобщенного вектора тока на оси ортогональной системы координат, вращающейся синхронно с вектором напряжения сети:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; \quad (3)$$

где $\theta = \omega \cdot t$ - значение угла поворота вращающейся системы координат с частотой ω .

Переменные составляющие проекций i_d и i_q , как будет показано ниже, соответствуют высшим гармоническим составляющим и обратной последовательности токов. Для выделения постоянных составляющих, несущих информацию об активной и реактивной мощности, применяются фильтры низких частот (ФНЧ), как в методе «мгновенной мощности».

Обратное преобразование Парка-Горева осуществляется по формуле:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; \quad (4)$$

Таким образом, если к трехфазной системе тока сначала применить прямое преобразование Кларка, а затем прямое преобразование Парка-Горева, то постоянные составляющие проекций на оси $d - q$ соответствуют составляющим тока синхронной частоты ω .

Непосредственное преобразование трехфазной системы координат в синхронную ортогональную осуществляется по:

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

На рис.3 представлена схема генерации задающего сигнала, при использовании преобразование Парка-Горева.

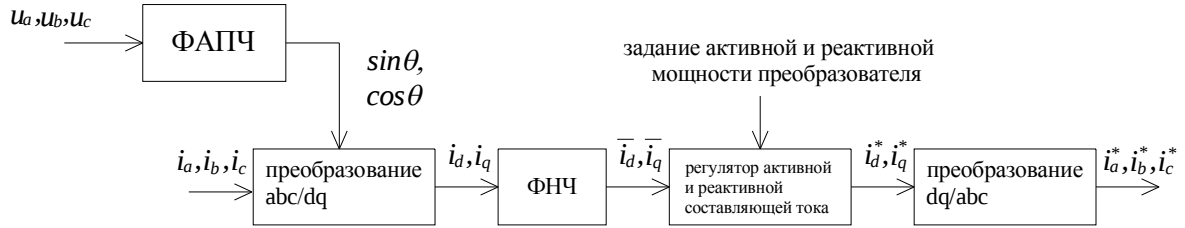


Рис.3 – Схема вычисления тока задания активного выпрямителя с использованием преобразования Парка-Горева

Регулятор активной и реактивной составляющей тока вычисляет значения токов задания преобразователя в синхронной системе координат. С помощью обратного преобразования можно синтезировать обобщенный вектор тока с заданными параметрами, т.е. модулем, начальной фазой и частотой вращения.

Угол сдвига фаз между первыми гармониками сетевого тока и напряжения в синхронной системе координат описывается выражением:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{i_q}{i_d} \right) \quad (6)$$

Таким образом, если прямое и обратное преобразование синхронизированы по фазе и частоте с напряжением сети, то регулирование до 0 составляющей тока сети i_q позволяет полностью управляемому преобразователю работать с коэффициентом мощности близким к 1.

В общем случае средние значения составляющих i_d и i_q определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{i}_d &= I_{1m} \cos\varphi \\ \bar{i}_q &= I_{1m} \sin\varphi \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, для обеспечения контроля коэффициента мощности преобразователя достаточно отслеживать средние значения составляющих обобщенного вектора тока и формировать синусоидальный ток.

Однако вышеописанные свойства характерны лишь для симметричной сети неизменной частоты. В условиях несимметрии питающей сети необходимо, чтобы прямое и обратное преобразования Парка-Горева были синхронизированы по фазе и частоте с фазным напряжением сети. В общем случае угол поворота θ может изменяться произвольным образом:

$$\theta = \int_0^t \omega \cdot dt \quad (8)$$

Так как в напряжении сети могут присутствовать высшие гармоники, то пересечение нуля кривой напряжения может не совпадать с нулевой фазой основной гармоники напряже-

ния сети, что приведет к неверному заданию тока преобразователя и снижению коэффициента мощности.

Сложный спектральный состав составляющих обобщенного вектора тока в случае несимметричной несинусоидальной сети усложняет выделение постоянных составляющих i_d и i_q .

В дальнейшем одно из свойств преобразования несимметричной сети будет использовано для реализации системы фазовой автоподстройки частоты.

Необходимость синхронизации с напряжением сети эталонных единичных сигналов ($\cos \theta$ и $\sin \theta$) является недостатком метода управления в синхронной системе координат.

Как было отмечено выше, необходимость синхронизации преобразования Парка-Горева по фазе и частоте с напряжением питающей сети требует применение дополнительных схемотехнических решений в системе управления ККМ. Для синхронизации может использоваться система фазовой автоподстройки частоты (Phase Locked Loop, PLL). Система ФАПЧ обеспечивает высокую точность при несинусоидальности напряжения сети, так как она является следящей системой. Использование прямого преобразования Парка-Горева позволяет реализовать систему ФАПЧ (рис.4), обеспечивающую отслеживание частоты сети и формирование эталонных единичных сигналов ($\cos \theta$ и $\sin \theta$).

В основу функционирования системы ФАПЧ положено следующее свойство преобразования Парка-Горева. Изменение частоты питающей сети можно трактовать как появлении несимметрии в трехфазной системе напряжений, что вызовет отклонение от нуля составляющей обобщенного вектора напряжения $\overline{U}_q$. Выделение постоянной составляющей, содержащей информацию о первой гармонике фазного напряжения сети, осуществляется низкочастотным фильтром (ФНЧ).

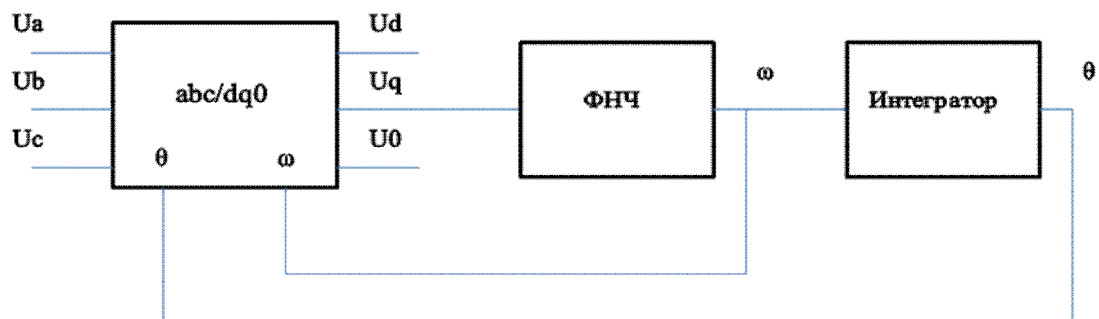


Рис.4 – Схема фазовой автоподстройки частоты

Значение угла поворота вращающейся системы координат может быть получено интегрированием угловой частоты (8). Благодаря наличию обратной связи обеспечивается слежение за изменением частоты сети.

Структурная схема блока PLL, входящего в состав библиотеки модуля SimPowerSystems, представлена на рис.5. Здесь вместо фильтра низкой частоты для выделения постоянной составляющей $\overline{U}_q$ используется блок измерения среднего значения переменного сигнала (Variable frequency mean value) с обратной связью по частоте входного сигнала. Пропорционально-интегральный регулятор обеспечивает непрерывное формирование значения угловой частоты ω .

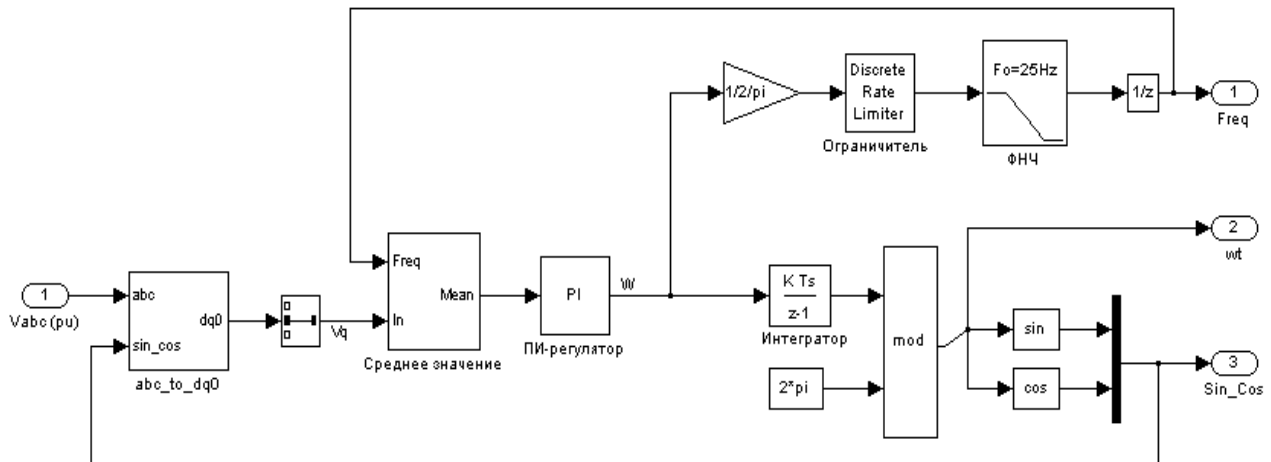


Рис.5 – Структурная схема модели фазовой автоподстройки частоты

Сигналы ($\cos \theta$ и $\sin \theta$) формируются внутри блока PLL и могут использоваться для синхронизации преобразования Парка-Горевы.

Рассмотренные принципы построения системы управления трехфазным выпрямителем с активной коррекцией коэффициента мощности реализуем средствами Matlab Simulink (рис.6). Дискретизация модели преобразователя позволяет увеличить скорость расчета.

Трехфазная система сетевых токов i_a, i_b, i_c преобразуется в двухфазную ортогональную систему i_d, i_q, i_0 , вращающуюся синхронно с обобщенным вектором напряжения сети. Синхронизация преобразования по фазе и частоте с фазным напряжением сети осуществляется блоком PLL, формирующим сигналы $\cos \theta$ и $\sin \theta$, поступающие на вход преобразователей координат. Если фазный ток синхронен с напряжением своей фазы, то компонент i_q не будет содержать постоянной составляющей.

Можно принудительно формировать постоянную составляющую $\bar{i}_d$, изменяя тем самым глубину регулирования активной мощности и величины тока потребляемого из сети согласно (7). При этом регулирование до нуля постоянной составляющей компонента i_q обеспечит минимальный угол сдвига фаз φ , а, значит, и работу преобразователя с коэффициентом мощности близким к 1

Таким образом, задача регулирования сводится к тому, чтобы формировать обобщенный вектор тока в синхронных координатах с заданной фазой и частотой вращения, обеспечивающий необходимый угол опережения первой гармоники фазного тока относительно первой гармоники напряжения своей фазы.

Регулятор активной и реактивной составляющей, выполненный на пропорционально-интегральных регуляторах, вычисляет значения токов задания преобразователя в синхронной системе координат. Составляющие i'_d и i'_q содержат информацию о значении угла сдвига фаз, с которым будет синтезирован обобщенный вектор тока.

НОСТИ

Результаты моделирования трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности в условиях неидеальной сети представлены на рис.7-11 и в таблице 1.

Таблица 1

Параметры и основные характеристики модели трехфазного выпрямителя	
Частота модуляции, кГц	4
Активная мощность на выходе, кВт	4–12
Коэффициент мощности	0,96-0,98
Частота сети, Гц	50±2
Линейное напряжение сети, В	380
Емкость сглаживающего фильтра, мкФ	2200
Индуктивность сглаживающего фильтра, мГн	4
Шаг дискретизации модели, мкс	0,5

При моделировании рассмотрено влияние изменения частоты сети и ее искажений на работу системы управления (рис.7). Так с момента времени $t=0,1$ с в сети генерируются высшие гармоники, частота сети с момента $t=0,3$ устанавливается на уровне 50,35 Гц. В момент $t=0,2$ с значение опорного сигнала по току $\bar{i}_a$ изменяется с 80 А до 150 А.

Особенностью схем с активной коррекцией коэффициента мощности, работающих по принципу параллельного импульсного регулятора, является выполнение условия превышения напряжения нагрузки над амплитудой линейного напряжения (в реальных схемах превышение составляет 50-100 В). Так, для принятых в модели параметров, преобразователь выходит из режима ККМ в диапазоне изменения опорного сигнала $\bar{i}_a$ от 0 до 60 А. Значение напряжения нагрузки при этом составляет около 600 В.

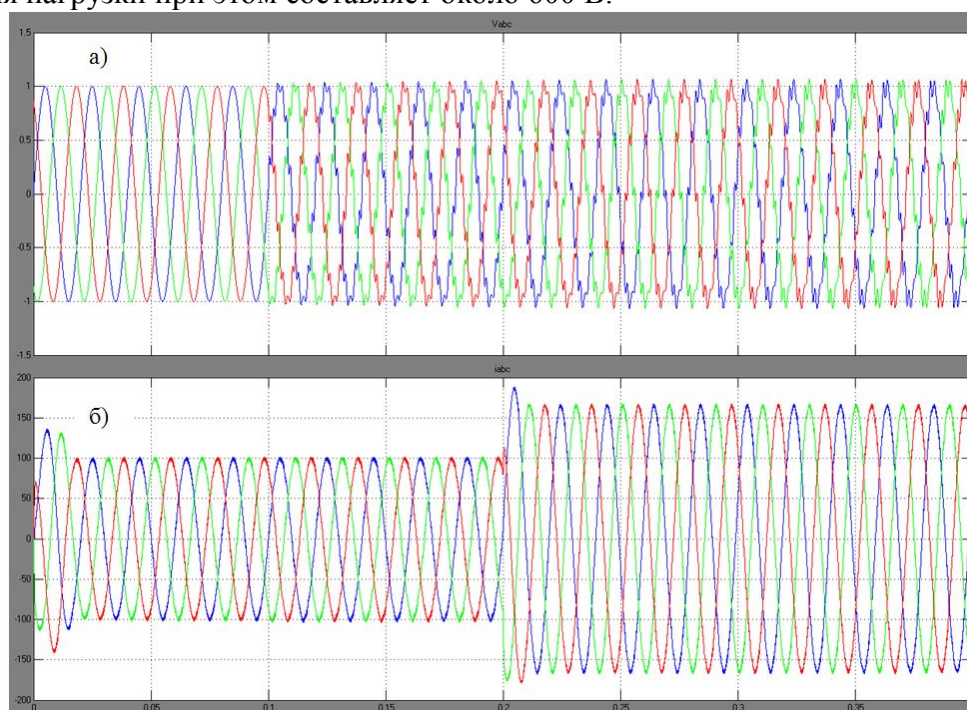


Рис.7 – Диаграммы напряжения (а) и тока сети (б), в относительных единицах

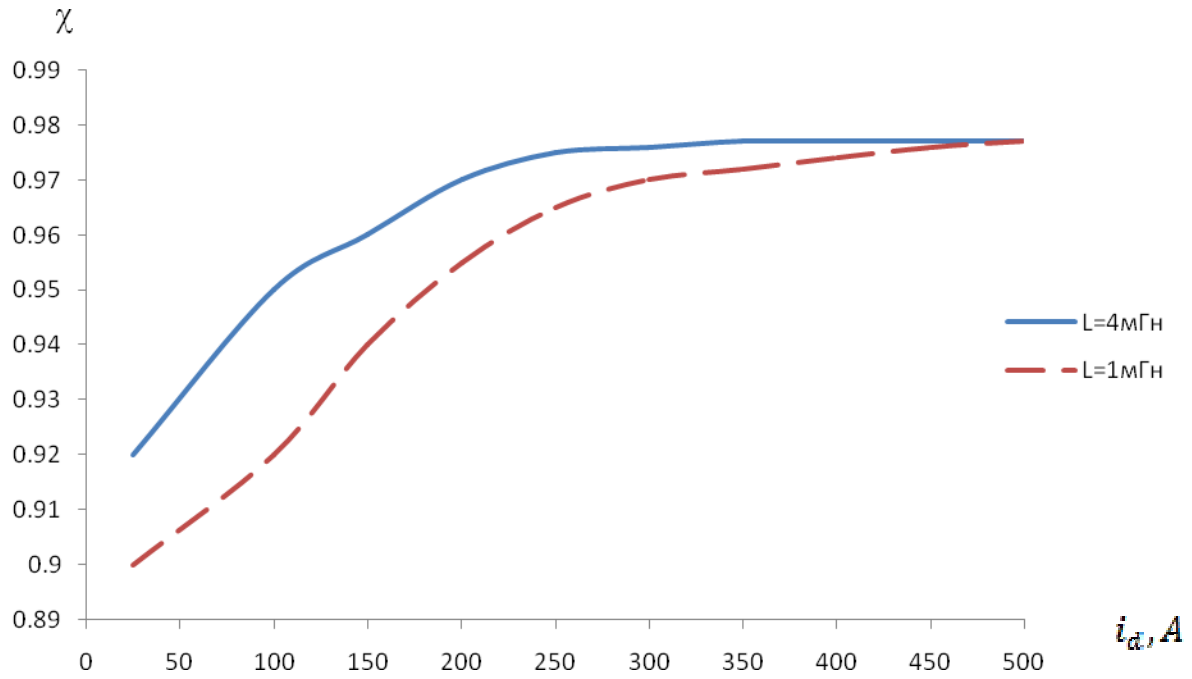


Рис.8 – Зависимость коэффициента мощности χ от глубины регулирования тока нагрузки i_d

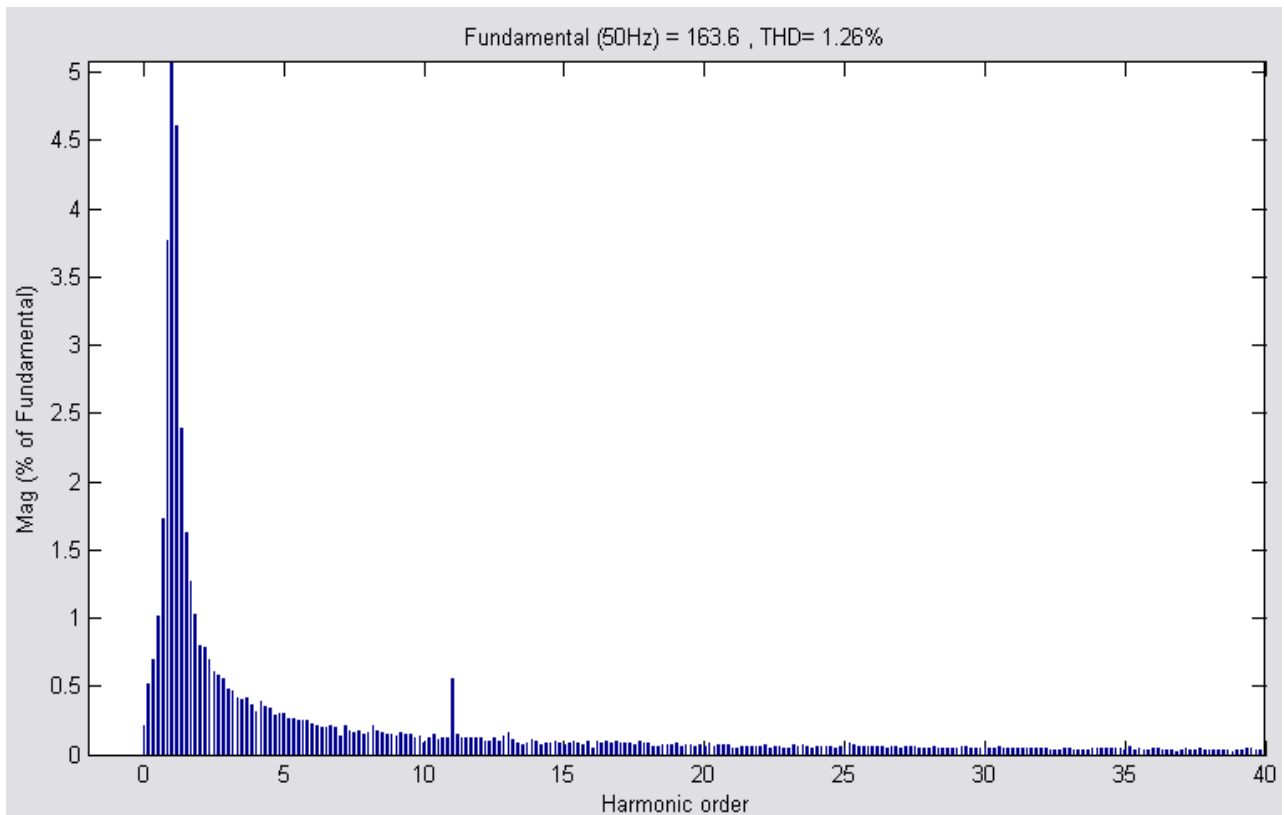


Рис.9 – Спектр сетевого тока

Значение индуктивности входных дросселей определяется, исходя из желаемого значения искажений входного тока выпрямителя. Результаты моделирования показывают возможность получения в установившемся режиме искажений входного тока выпрямителя менее 5% и коэффициента мощности близкого к 1 при принятых в модели параметрах.

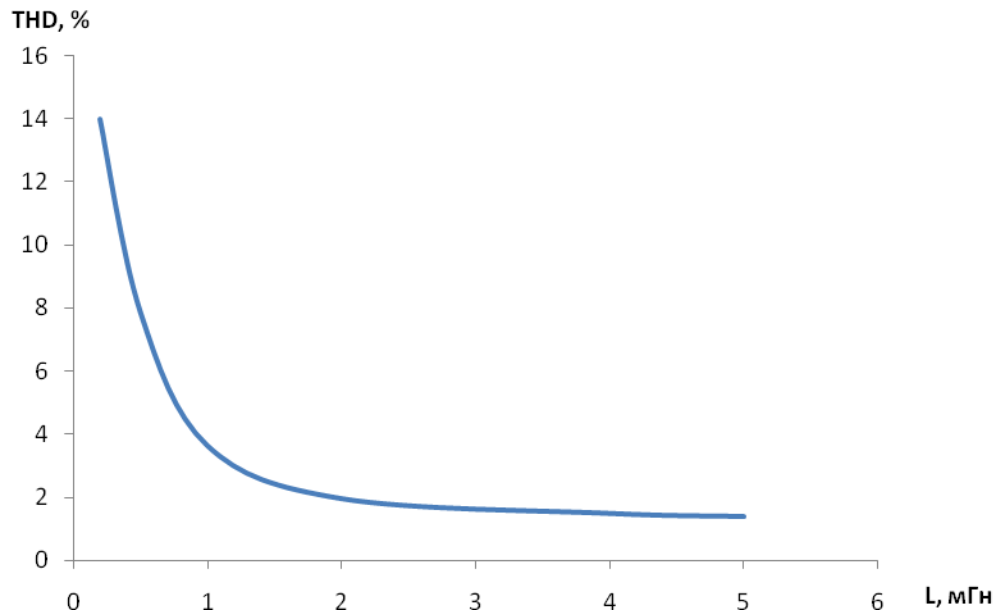


Рис.10 –Зависимость коэффициента искажения сетевого тока от величины индуктивности входного дросселя

Зависимость коэффициента мощности от номиналов индуктивностей сетевых дросселей в установившемся режиме и при идеальной сети представлена на рис.11. Для частоты модуляции 4 кГц оптимальное значение индуктивностей дросселей составляет 1-4 мГн.

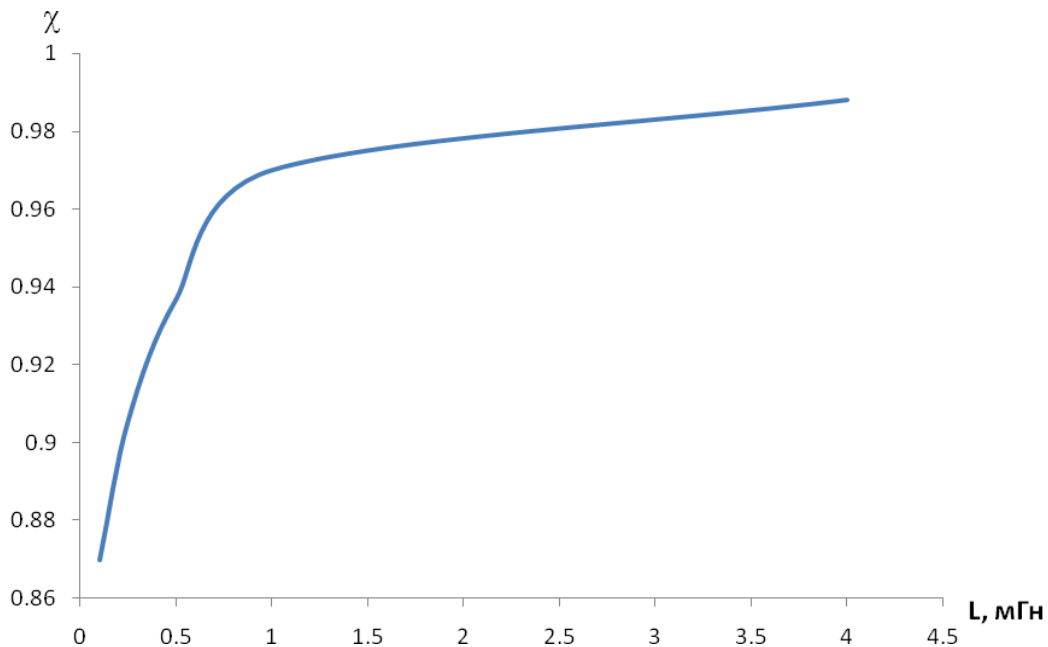


Рис.11 – Зависимость коэффициента мощности выпрямителя от величины индуктивности входного дросселя

Таким образом, преимуществом предложенного способа управления является обеспечение высокого коэффициента мощности в широком диапазоне регулирования выходных параметров выпрямителя. Результаты моделирования в среде Matlab Simulink показали работоспособность следящей системы управления по компонентам обобщенного вектора тока в синхронных координатах при различных индуктивностях входного фильтра. Выпрямитель устойчиво работает в условиях неидеальной сети, быстро и без срывов выходит на новый режим работы, определяемый системой управления.