

А. А. ПЛАХТИЙ, аспирант, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТОЙ МОДУЛЯЦИИ

Введение. Активные трехфазные выпрямители с коррекцией коэффициента мощности обладают рядом преимуществ по сравнению с диодными и тиристорными выпрямителями, они позволяют реализовать коэффициент мощности близкий к единице, форму входных фазных токов близкую к синусоиде, а также двунаправленную передачу энергии. В связи с этим данный тип преобразователей обретает все больший интерес.

Постановка проблемы. Наиболее распространенными являются системы управления активными трехфазными выпрямителями основанные на гистерезисной модуляции [1, 2]. Достоинством данного типа модуляции является простота, возможность реализации коэффициента мощности близкого к единице (в установленном режиме не менее 0,99), реализация режимов выпрямления и рекуперации. Однако он же имеет существенный недостаток, а именно переменную частоту модуляции, достигающую десятков кГц. Высокие частоты коммутации ключей обуславливают ограничение применения элементной базы IGBT при реализации преобразователей мощностей порядка нескольких МВт. Кроме этого повышенные частоты коммутации вызывают увеличение динамических потерь в IGBT ключах. Актуальным является вопрос реализации и исследования АВН с системой управления с постоянной частотой модуляции.

Целью данной работы является исследование энергетических характеристик активных трехфазных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности при реализации системы автоматического управления с широтно-импульсной модуляцией.

Материалы исследований. Существуют различные топологии активных трехфазных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности. Среди них следует отметить активный выпрямитель напряжения, активный выпрямитель тока и Виена-выпрямитель [3]. Активный выпрямитель напряжения (далее АВН) в сравнении с другими топологиями обладает следующими преимуществами: данная схема обеспечивает двунаправленную передачу энергии и предъявляет меньшие нагрузочные требования к IGBT ключам. Схема АВН представлена на рисунке 1. Схема состоит из шести силовых IGBT ключей, выходного конденсатора и трех входных дросселей.

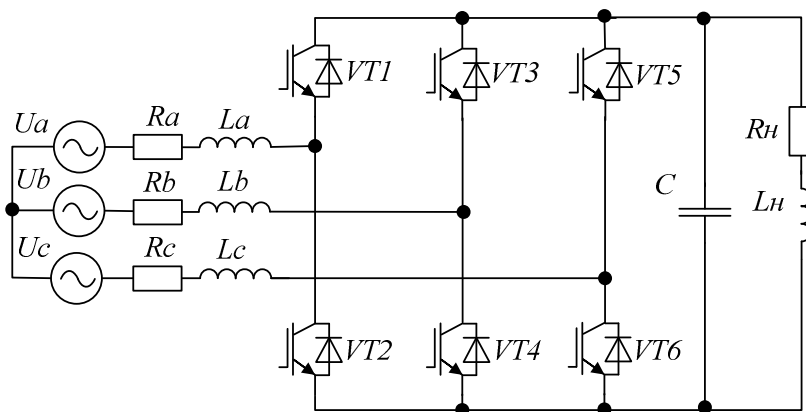


Рис. 1. Схема активного трехфазного выпрямителя

Система автоматического управления АВН. Не менее важной составляющей преобразователя является его система автоматического управления. В общем случае, система автоматического управления АВН состоит из следующих составляющих: измерителей входных фазных токов и напряжений, измерителей выходного напряжения, измерителя выходного тока (для регулирования процесса рекуперации), регулятор выходного напряжения, блок модуляции. Так же в системе управления может быть реализован блок преобразования систем координат $abc-\alpha\beta 0$, $abc-pqr$, $abc-dq0$ для применения теорий мгновенных мощностей, а также реализации прогнозирующего управления [4].

В существующих системах управления АВН наиболее часто применяемой является гистерезисная модуляция. Система управления с гистерезисным модулятором приведена на рисунке 2. В гистерезисной системе управления регулирование выходного напряжения осуществляется путем сравнения мгновенных значений линейных напряжений и масштабированных значений фазных токов и подачи сигнала рассогласования на гистерезисный модулятор.

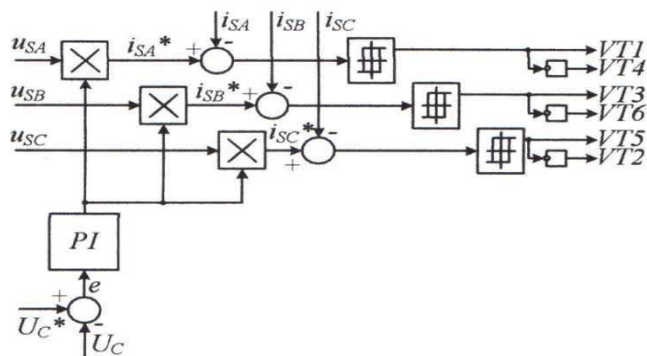


Рис.2 Система управления с гистерезисным модулятором

Входные фазные токи АВН повторяют форму опорного сигнала, полученного из сигналов фазных напряжений, но с амплитудой необходимой для поддержания заданного уровня выходного напряжения. Выходным сигналом регулятора выходного напряжения является ξ , который формирует амплитуду входного фазного тока, от которой зависит амплитуда выходного напряжения.

Существенным недостатком гистерезисной модуляции является переменная частота коммутации ключей. Это обуславливает максимальные частоты коммутации ключей порядка нескольких десятков кГц, что налагает ограничение на применение элементной базы IGBT при реализации мощностей порядка нескольких МВт. Кроме этого повышенные частоты коммутации вызывают увеличение динамических потерь в IGBT ключах. Исходя из частотных характеристик существующей базы IGBT транзисторов, для АВН тяговых подстанции с мощностью до десятка МВА предпочтительна реализация частот коммутации порядка 1-4 кГц.

Автором предложена система автоматического управления активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности с широтно-импульсной модуляцией. В системе управления сигнал рассогласования масштабированных входных фазных токов и напряжений Δi_a подается на апериодическое звено первого порядка, синусоидальной выходной сигнал которого идет на двустороннюю ШИМ. При этом наличие апериодического звена обязательно, так как без него частота коммутации ключей будет выше частоты модуляции. Предложенная система управления с двусторонней широтно-импульсной модуляцией приведена на рисунке 3.

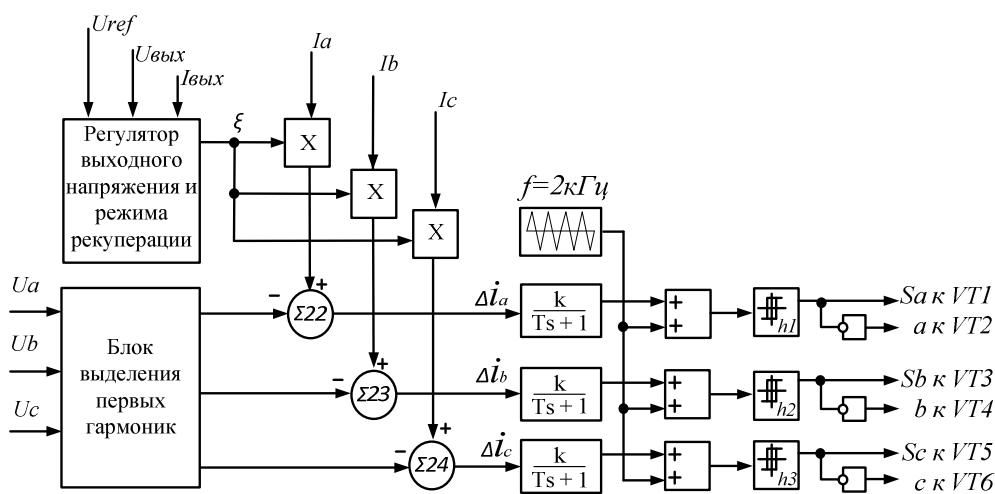


Рис. 3. Система автоматического управления трехуровневого активного выпрямителя

где: $U_{вых}$ – выходное напряжение активного выпрямителя; $I_{вых}$ – выходной ток активного выпрямителя U_{ref} – уровень задания выходного напряжения активного выпрямителя; U_{abc} – мгновенные значения фазных напряжений; I_{abc} – мгновенные значения фазных токов АВ; S_{abc} – сигналы управления ключей;

Проектирование регулятора выходного напряжения возможно исходя из регулировочных характеристик и динамических свойств преобразователя. Для предложенной системы управления была получена регулировочная характеристика - зависимость выходного напряжения от регулировочного коэффициента ξ , рисунок 4. Регулировочная характеристика приведена в двух квадрантах работы преобразователя: выпрямления и рекуперации. Режим рекуперации реализуется при превышении выходного напряжения выше заданного уровня и смене направления выходного тока, при этом регулятор выдает отрицательное ξ . При этом токи будут сдвинуты относительно напряжения на 180° , а энергия будет передаваться из звена постоянного тока в трехфазную сеть.

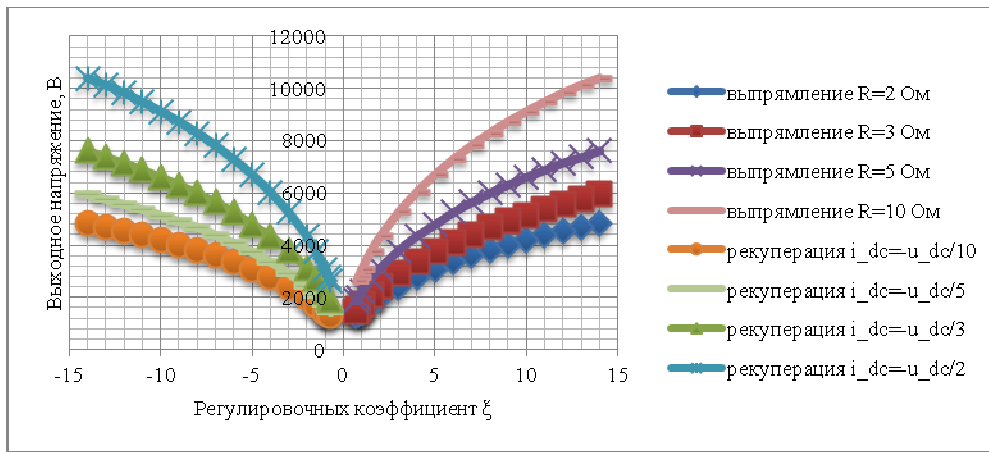


Рис. 4 Регулировочные характеристики АВН в режимах выпрямления и рекуперации

Как видно из рисунка 4, регулировочная характеристика АВН $U_{\text{вых}}=f(\xi)$ имеет явно выраженный нелинейный характер при изменении тока нагрузки. В связи с этим для работы в двух квадранта наиболее целесообразно синтезировать адаптивный ПИД регулятор с обратной связью по выходному напряжению и току. Синтез регулятора и анализ его устойчивости является достаточно обширный вопросом, которому будет посвящена отдельная статья.

Имитационная Matlab-модель активного трехфазного выпрямителя. Для подтверждения преимуществ предложенной системы управления в пакете Matlab r2011 была создана имитационная модель активного выпрямителя с двумя типами модуляторов: ШИМ и гистерезисным модулятором. Модель представлена на рисунке 5. Параметры имитационной модели приведены в таблице 1.

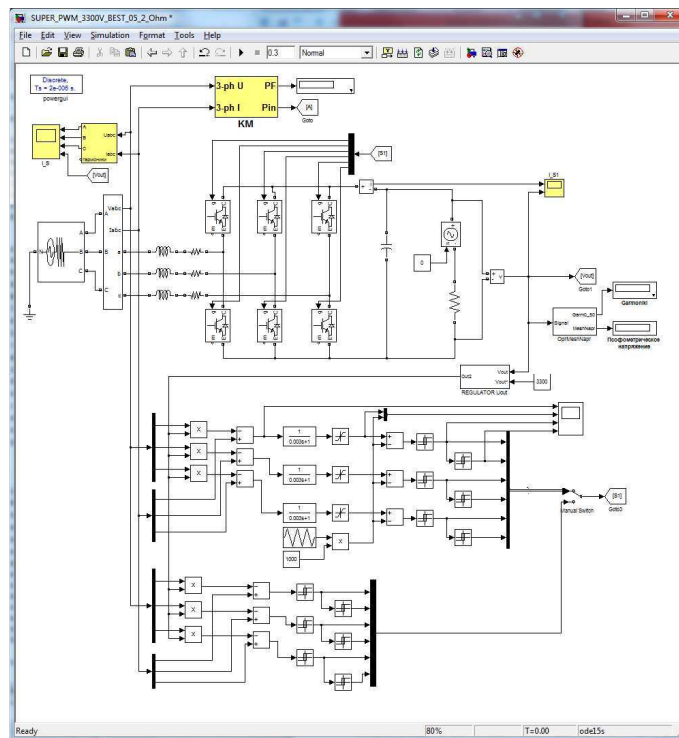


Рис. 5. Модель Matlab трёхуровневого активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности

Таблица 1 - Параметры имитационной Matlab-модели АВН

Параметр	Значение параметра
Межфазное напряжение трехфазной сети	1400В
Индуктивность входного дросселя	0,6 мГн
Активное сопротивление входного дросселя	0,5 Ом
Выходная емкость	9 мФ
Внутреннее сопротивление IGBT	2 мОм
Сопротивление нагрузки	2÷14 Ом
Частота модуляции ШИМ, кГц	2

В ходе моделирования были получены энергетические характеристики преобразователя при работе с различными типами модуляции: коэффициент мощности, коэффициент гармонических искажений фазного тока (THD), коэффициент пульсаций выходного напряжения, уровень псофометрического напряжения. Основные результаты Фурье-анализа фазных токов и выходного напряжения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты Фурье-анализа фазных токов и выходного напряжения выполненные в Matlab.

Параметр	Гистерезисная модуляция	ШИМ
Фурье-анализ выходного напряжения		
Фурье-анализ фазного тока выпрямителя		

Как видно таблицы 2 спектры гармоник фазного тока и выходного напряжения, полученные при гистерезисной модуляции и ШИМ, различны. Для ШИМ характерны гармоники кратные частоте модуляции, в то время как для гистерезисной модуляции характерен более широкий спектр.

Анализ энергетических характеристик. Сравнение качества реализуемой электроэнергии при работе с гистерезисной модуляцией и ШИМ проводилась по следующим параметрам: коэффициент мощности, коэффициент гармонических искажений, коэффициента пульсации, уровень псофометрического напряжения и КПД.

Коэффициент мощности с учетом наличия в форме фазного напряжения и тока высших гармоник коэффициент мощности может быть рассчитан согласно формуле 1.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{I_{1\text{RMS}}}{I_{\text{RMS}}} \cdot \frac{U_{1\text{RMS}}}{U_{\text{RMS}}} \cdot \cos(\varphi) \quad (1)$$

Уровень наличия высших гармоник в форме фазного тока часто выражают через коэффициент гармонических искажений (K_r или THD) — величину, выражающую степень нелинейных искажений в сигнале тока и равную отношению среднеквадратичного напряжения суммы высших гармоник сигнала, кроме первой, к первой гармонике тока при воздействии на вход устройства синусоидального сигнала. Коэффициент гармонических искажений может быть рассчитан по формуле 2.

$$K_r = THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (2)$$

Коэффициент пульсаций выходного напряжения равен отношению среднеквадратического значения суммы высших гармоник выходного напряжения и значения постоянной составляющей. Коэффициент пульсаций может быть рассчитан по формуле 3.

$$K_{\text{пульс}} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + V_6^2 + \dots}}{V_{dc}} \quad (3)$$

Уровень психофотометрического (мешающего) напряжения является интегральным показателем, который характеризует уровень наличия высших гармоник в выходном напряжении выпрямительной установки, которые влияют на близлежащие линии связи. Уровень психофотометрического напряжения может быть рассчитан согласно формуле 4:

$$U_{\text{мешающее}} = \sqrt{(V_n \cdot K_n)^2} \quad (4)$$

При расчете КПД учитывались следующие потери в преобразователе: потери в активном сопротивлении входных дросселей, потери в IGBT ключах, потери в эквивалентном последовательном сопротивлении выходного конденсатора. Расчет КПД выполнен по формуле 5.

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{потерь}}}{P_{\text{вх}}} \quad (5)$$

Сравнение энергетических характеристик АВН при реализации в системе управления гистерезисной и широтно-импульсной модуляции приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Энергетические характеристики АВН при работе с гистерезисной и широтно-импульсной модуляцией

Параметр	Гистерезисная модуляция	Широтно-импульсная модуляция
Коэффициент мощности, %	99,99	99,83
Коэффициент гармонических искажений фазного тока, (ТНД), %	1,17	2,72
Амплитуда пульсации выходного напряжения, В	14,21	23,36
Коэффициент пульсаций выходного напряжения, %	0,116	0,209
Уровень психофотометрического напряжения, В	2,15	3,93
КПД, %	93,45	95,62

Выводы: Реализация ШИМ в АВН по сравнению гистерезисной модуляцией имеет ряд преимуществ: снижение частот коммутации ключей, что обуславливает снижение динамических потерь в IGBT и как следствие повышение КПД активного выпрямителя и расширение диапазона реализуемых мощностей. В программе Matlab была разработана имитационная модель активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности с ШИМ. Результаты имитационного моделирования показали, что ШИМ реализует сравнительно худшее, но, тем не менее, вполне удовлетворительное качество выходного напряжения и входных фазных токов, однако позволяет снизить частоту коммутации и повысить КПД.

Список литературы: 1. Овчинников Д.А., Кастров М.Ю., Трехфазный выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности [Текст] / Практическая силовая электроника. 2002. вып. 6. с. 12–39. 2. Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук. Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Част. 2. – 2011. С.75 – 82. 3. J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt, and P. Lezana, "PWM regenerative rectifiers: state of the art," [Текст], IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 52, pp. 5-22, 2005. 4. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "A new approach to harmonic compensation in power system—A combines system of shunt passive and series active filters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 26, no. 6, pp. 983–990, Dec. 1990.

Bibliography (transliterated): 1. Ovchinnikov, D.A., Kastrov M. Yu. (2002), Tryehfazniy vipryamitel' s korrektsiyei koeffitsienta moshchnosti, Practical Power Electronic, , No. 6, pp.12-39. 2. G.G. Zhemerov, O.I. Koval'chuk. Avtonomnyj vypryamitel' - istochnik napryazheniya s gisterezisnoj sistemoj upravleniya // Tehnichna elektrodinamika. Tem. vip. Silova elektronika ta energoefektivnist'. Chast. 2. - 2011. S. 75-82. 3. J. R. Rodríguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt, and P. Lezana, "PWM regenerative rectifiers: state of the art," [Текст], IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 52, pp. 5-22, 2005. 4. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "A new approach to harmonic compensation in power system—A combines system of shunt passive and series active filters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 26, no. 6, pp. 983–990, Dec. 1990.

Поступила (received) 25.08.2015