

Я. В. ЩЕРБАК, докт. техн. наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства;
А. А. ПЛАХТИЙ, канд. техн. наук, ассист. Государственный университет ж.-д. транспорта, Харьков;
В. П. НЕРУБАЦКИЙ, ст. преп., Государственный университет ж.-д. транспорта, Харьков.

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО ЧЕТЫРЕХКВАДРАНТНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Введение. В составе современного тягового электропривода электровозов переменного тока все большее распространение находят активные четырехквadrантные выпрямители, известные в международной литературе как 4QS-преобразователи. Значительными их преимуществами в сравнении с диодными и тиристорными выпрямителями являются возможность реализации коэффициента мощности близкого к единице, формирование входного тока близкого к синусоиде, а также возможность реализации двунаправленной передачи электроэнергии, что значительно повышает энергоэффективность.

Постановка проблемы. От типа модуляции, примененной в системе управления активного выпрямителя, в значительной степени зависят, как уровень эмиссии высших гармоник в питающую сеть, так и КПД самого преобразователя. На данный момент существует достаточно большое количество различных систем управления 4QS-преобразователей, в которых наибольшее распространение нашли системы управления, основанные на гистерезисной модуляции [1, 2] и ШИМ [3]. Значительным недостатком гистерезисных систем управления является изменяемая в достаточно широком диапазоне частота коммутации силовых ключей, которая достигает нескольких десятков кГц. При этом следует отметить, что диапазон частот коммутации силовых ключей активного выпрямителя с гистерезисной модуляцией является неизвестным на стадии проектирования, а его аналитический расчет с учетом диапазона тока нагрузки является достаточно сложной задачей. Высокие частоты коммутации ключей обуславливают значительные потери в преобразователе, а изменяемая частота коммутации силовых ключей обуславливает достаточно широкий спектр высших гармоник. В связи с этим более предпочтительными являются системы управления, реализующие постоянную и устанавливаемую частоту коммутации, что обеспечивает применение различных типов широтно-импульсной модуляции. Широко известны системы управления основанные на одноканальной синусоидальной ШИМ [4, 5]. Авторами предложены системы управления 4QS-преобразователями, которые благодаря алгоритмам двухканальной синусоидальной модуляции и фазосдвинутой компенсации высших гармоник (интерливинга), позволяют значительно улучшить энергетические показатели.

Целью данной работы является представление улучшенных систем управления 4QS-преобразователя, а также результатов исследований активных четырехквadrантных выпрямителей при реализации систем управления с различными типами модуляции: одноканальной ШИМ, двухканальной ШИМ и компенсационной двухканальной ШИМ.

Материалы исследований. Основными требованиями, предъявляемые к современному электроподвижному составу (ЭПС), являются: обеспечение максимально возможного КПД, минимизация дополнительных потерь связанных с эмиссией высших гармоник в питающую сеть, снижение потерь вызванных реактивной составляющей мощности, а также возможность реализации рекуперации энергии в питающую сеть в режиме электрического торможения. Одним из путей обеспечения вышеуказанных требований на ЭПС переменного тока является применение активных 4QS-выпрямителей (см. рисунок 1).

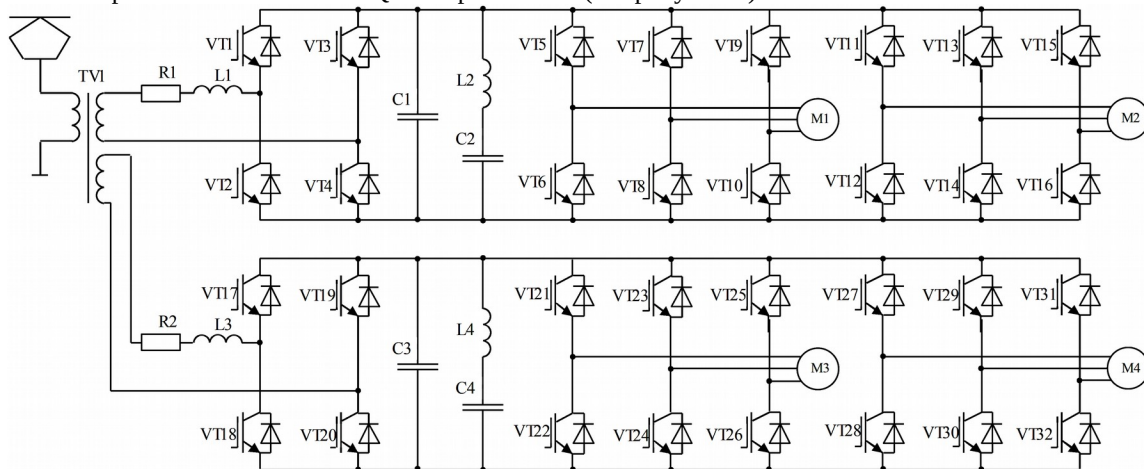


Рис. 1. Структура тягового электропривода электровоза переменного тока с входными 4QS-преобразователями
 Уровень эмиссии высших гармоник электроподвижного состава переменного тока в режиме тяги и рекуперации в значительной степени зависит от типа реализованного входного преобразователя и его управления.

В общем случае, система управления активного выпрямителя состоит из следующих составляющих: измерителей мгновенных значений входного тока и напряжения, сумматора, измерителя выходного напряжения, фильтра низких частот (ФНЧ), измерителя выходного тока, регулятора выходного напряжения и режима рекуперации и блока модуляции. Именно типа заложенной модуляции активного выпрямителя зависит спектр высших гармоник входного тока и реализованный КПД.

Система управления 4QS-преобразователя с одноканальной синусоидальной ШИМ.

Широко известна система управления 4QS-преобразователя с одноканальной синусоидальной ШИМ, структурная схема которой приведена на рисунке 2.

В системе управления с одноканальной ШИМ сигнал рассогласования Δi_a , полученный как разность мгновенного значения входного напряжений $U_{вх}$ и мгновенного значения входного тока $I_{вх}$, масштабируемого регулятором ξ , подается на фильтрующее апериодическое звено

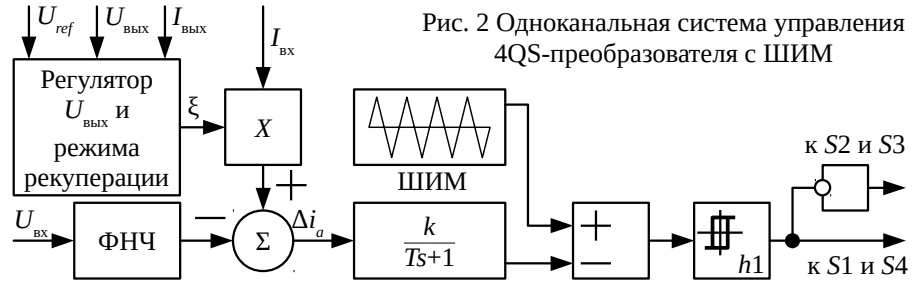


Рис. 2 Одноканальная система управления 4QS-преобразователя с ШИМ

первого порядка, с которого вместе с двусторонней опорной ШИМ подается на компаратор. При этом входной ток 4QS-преобразователя повторяют форму сигнала рассогласования Δi_a , являющийся синусоидальным.

Выходным сигналом регулятора выходного напряжения является регулировочный коэффициент ξ , который задает амплитуду входного тока, необходимую для поддержания заданного уровня выходного напряжения.

На рисунке 2 приведены следующие обозначения: $U_{вх}$ – выходное напряжение активного выпрямителя; $I_{вх}$ – выходной ток активного выпрямителя; U_{ref} – задание уровня выходного напряжения активного выпрямителя; $U_{вх}$ – мгновенное значение входного напряжений; $I_{вх}$ – мгновенное значение входного тока; S1, S2, S3, S4 – сигналы управления силовых ключей VT1, VT2, VT3, VT4; ФНЧ – фильтр низких частот.

Процессы модуляции U в одноканальной синусоидальной ШИМ приведены на рисунке 3. Как видно из рисунка, в одноканальной синусоидальной ШИМ коммутация всех четырех силовых ключей происходит на частоте опорного пилообразного сигнала. При этом входной ток 4QS-преобразователя также будет коммутироваться с частотой опорного сигнала ШИМ, что обуславливает кратность высших частот гармоник входного тока частоте опорного сигнала ШИМ. Более предпочтительными являются системы управления, в которых коммутация входного тока будет происходить с удвоенной частотой относительно частоты опорного сигнала ШИМ, что позволит снизить уровень высших гармоник и снизить результирующий коэффициент гармонических искажений (total harmonic distortion – THD) входного тока.

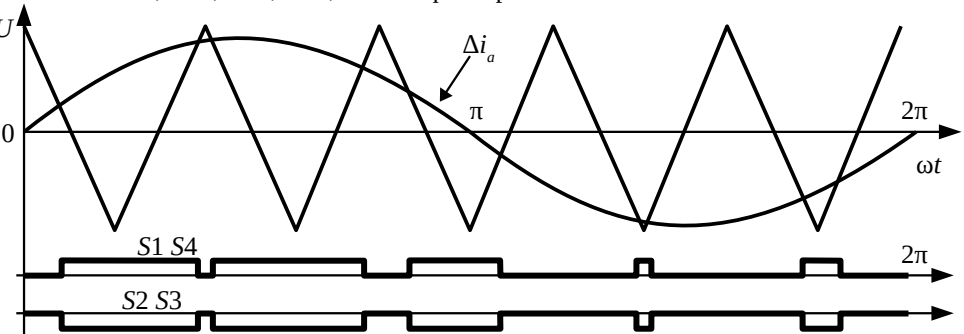


Рис.3 Одноканальная система управления 4QS-преобразователя с ШИМ

Система управления 4QS-преобразователя с двухканальной синусоидальной ШИМ.

Повышение кратности частоты коммутации входного тока, а следовательно и снижение амплитуды высших гармоник, может быть получено путем реализации индивидуального управления всеми ключами 4QS-выпрямителя, что обеспечивается добавлением дополнительного второго канала управления пары ключей VT3 и VT4 при инверсии во втором канале управления сигнала рассогласования Δi_a . Предложенная система управления с двухканальной широтно-импульсной модуляцией приведена на рисунке 4.

Процессы модуляции в двухканальной синусоидальной ШИМ приведены на рисунке 5.

В отличие от одноканальной, система управления двухканальной ШИМ имеет два компаратора, на которые сигнал рассогласования Δi и опорный ШИМ-сигнал подаются с разными знаками. При этом происходит отдельное управление пар ключей VT1-VT2 и VT3-VT4, которые сдвинуты во времени, что позволяет удвоить частоту коммутации входного тока относительно частоты опорного ШИМ-сигнала, чем достигается улучшение синусоидальности входного тока.

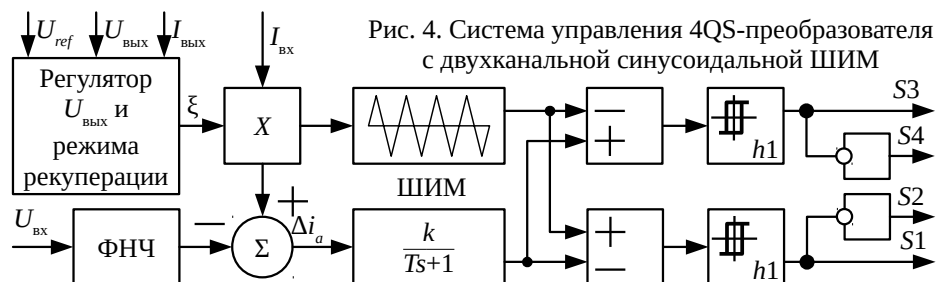


Рис. 4. Система управления 4QS-преобразователя с двухканальной синусоидальной ШИМ

Система управления 4QS-преобразователя с компенсационной двухканальной ШИМ. В ряде случаев, как например, в электровозе переменного тока, преобразование электроэнергии происходит при параллельном питании нескольких 4QS-преобразователей (рис. 1). При реализации систем управления каждого из параллельно работающих преобразователей, рекомендуется выполнить синхронизацию и взаимный сдвиг опорных ШИМ сигналов на компенсационный электрический угол φ . При этом высшие гармоники входных токов в параллельно работающих преобразователях также будут взаимно сдвинуты, чем достигается их взаимная компенсация в общем суммарном токе, который потребляется из сети. Для достижения эффекта компенсации высших гармоник при реализации в каждом из преобразователей двухканальной ШИМ необходимо обеспечить синхронизацию и сдвиг опорных ШИМ сигналов на угол равный

$$\varphi = \frac{360}{2} m,$$

где m – число параллельных синхронизированных 4qs-преобразователей.

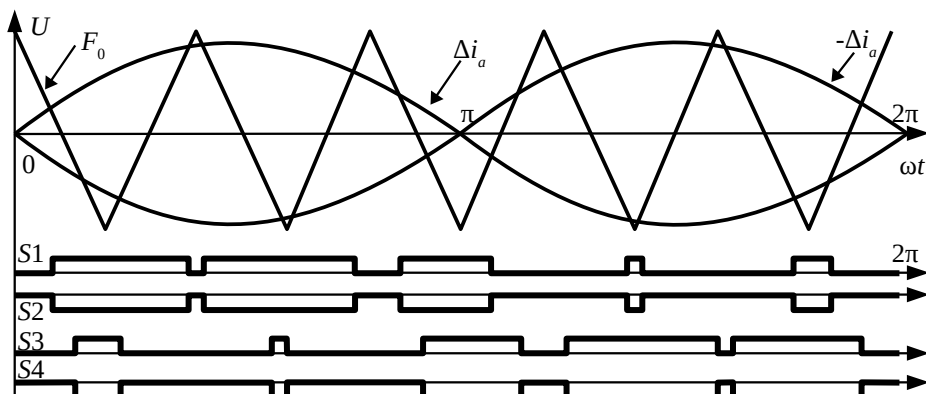


Рис. 5. Процессы модуляции в двухканальной синусоидальной ШИМ

Структурная схема системы управления 4QS-преобразователя с компенсационной двухканальной ШИМ приведена на рисунке 6.

Предложенный принцип компенсации высших гармоник входного тока путем сдвига фаз высших гармоник приведен на рисунке 7, на котором представлены следующие обозначения: 1 – мгновенное значение тока потребляемого первым 4QS-преобразователем; 2 – мгновенное значение тока потребляемого вторым 4QS-преобразователем; 3 – форма общего потребляемого из сети тока.

Как видно из рисунка 7, амплитуда высших гармоник общего входного тока значительно уменьшилась, а частота увеличилась вдвое. Многократное увеличение частоты коммутации входного тока, относительно частоты коммутации силовых ключей, значительно улучшает его синусоидальность.

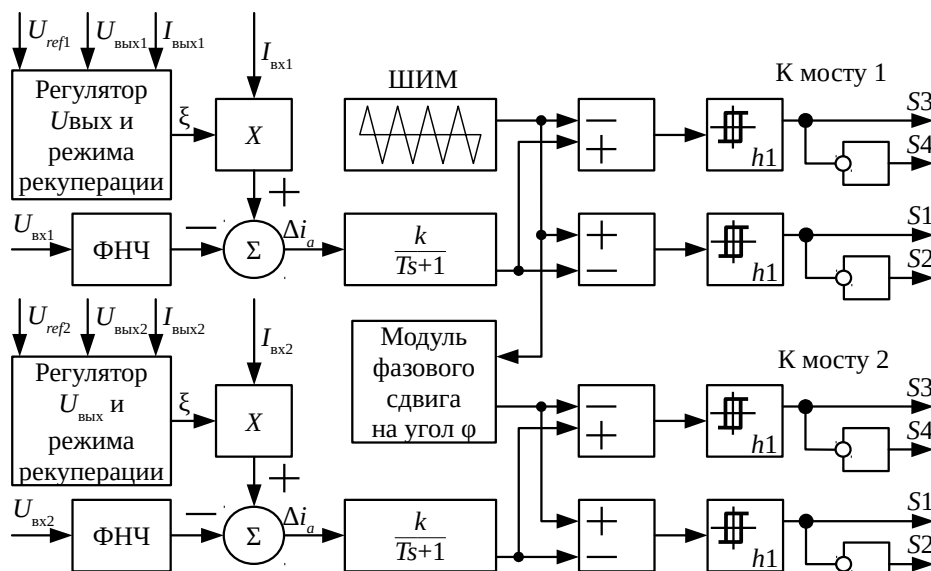


Рис. 6 двухканальная компенсационная система управления с ШИМ

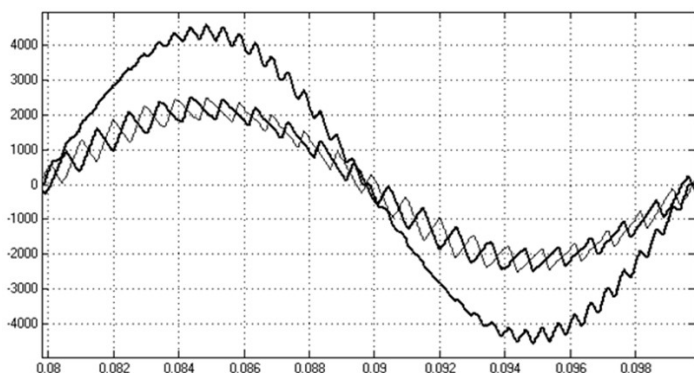


Рис. 7. Осциллограмма входных токов двух параллельных 4QS-преобразователей с компенсационной двухканальной ШИМ и форма общего потребленного из сети тока

Таким образом, при заданном требуемом уровне высших гармоник входного тока, применение компенсационной двухканальной ШИМ позволяет снизить частоту коммутации силовых ключей, чем достигается снижение динамических потерь в преобразователе и повышение результирующего КПД.

Имитационная модель активного четырёхквadrантного выпрямителя. Для подтверждения преимуществ предложенной компенсационной системы управления в пакете Matlab r2011 была создана имитационная модель тягового электропривода электровоза переменного тока с входными 4QS-преобразователями. Модель представлена на рисунке 8. Параметры имитационной модели приведены в таблице 1.

В ходе моделирования были получены энергетические характеристики 4QS-преобразователей: установлены значения коэффициента мощности, коэффициента гармонических искажений входного тока (THD), коэффициента пульсаций выходного напряжения. Результаты Фурье-анализа входных токов и выходного напряжения приведены на рисунке 9.

Как видно на рисунке 9, 4QS-преобразователь с одноканальной ШИМ с частотой опорного сигнала 2 кГц реализовал THD = 7,11%; двухканальная ШИМ с частотой опорного сигнала реализовала THD = 2,07%; компенсационная двухканальная ШИМ на сниженной частоте опорного сигнала 1 кГц реализовала наилучшее значение THD = 2,07%. Как видим различны и спектры гармоник входного тока, полученные при различных типах ШИМ модуляции. Для одноканальной ШИМ характерны гармоники кратные частоте модуляции. Для двухканальной ШИМ спектр высших гармоник кратен удвоенной частоте опорного сигнала ШИМ. Для компенсационной двухканальной ШИМ характерен четырехкратный спектр высших гармоник относительно частоты опорного сигнала ШИМ.

Сравнение полученных энергетических характеристик 4QS-преобразователя при реализации различных систем управления приведены в таблице 2.

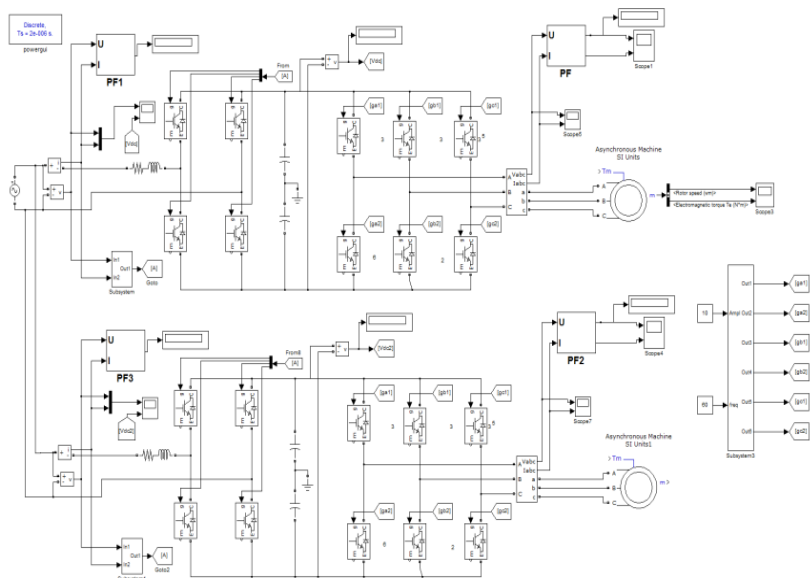


Рис. 8. Имитационная модель тягового электропривода электровоза переменного тока с входными 4QS-преобразователями, автономными инверторами напряжения и тяговыми асинхронными двигателями

Таблица 1 – Параметры имитационной модели тягового электропривода электровоза переменного тока

| Параметр | Значение параметра |
|---|--------------------|
| Входное напряжение 4QS-преобразователя | 600 В |
| Индуктивность входного дросселя | 0,6 мГн |
| Активное сопротивление входного дросселя | 0,1 Ом |
| Выходная емкость | 6 мФ |
| Ток нагрузки в звене постоянного напряжения | 300÷1800 А |
| Частота модуляции ШИМ | 1 кГц |

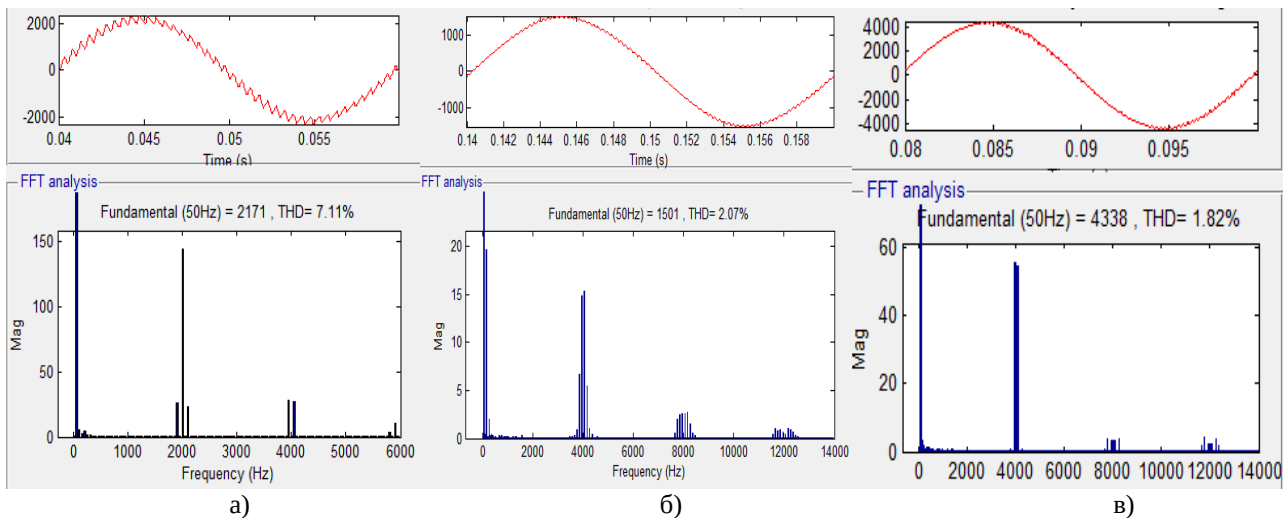


Рис. 9. Результаты Фурье-анализа входного тока 4QS-преобразователя при реализации: 1 – одноканальной ШИМ с частотой опорного сигнала 2кГц; 2 – двухканальной ШИМ с частотой опорного сигнала 2 кГц; 3 – двухканальной компенсационной ШИМ с частотой опорного сигнала 1 кГц

Таблица 2 – Энергетические параметры активного выпрямителя с различными системами управления

| Параметр | ШИМ | Одно- канальная | Двух- канальная | Компенсационная двухканальная |
|---|-----|--|--|--|
| КПД, (при использовании ключей CM1200HC-90R и входной мощности 1200 кВт), % | | 96,26 | 96,26 | 97,9 |
| Динамические потери в IGBT типа CM1200HC-90R (при токовой нагрузке одного ключа 1000 А), Вт | | 5606,04 | 5606,04 | 3117,29 |
| Частота коммутации силовых ключей, Гц | | 2000 | 2000 | 1000 |
| Кратность высших гармоник входного тока относительно опорного сигнала ШИМ | | $\sum_{n=1}^{n=\infty} n f_{\text{ШИМ}}$ | $\sum_{n=1}^{n=\infty} 2 n f_{\text{ШИМ}}$ | $\sum_{n=1}^{n=\infty} 4 n f_{\text{ШИМ}}$ |
| Коэффициент мощности в режиме выпрямления, % | | 99,63 | 99,87 | 99,86 |
| Коэффициент мощности в режиме рекуперации, % | | 99,23 | 99,74 | 99,74 |
| Коэффициент гармонических искажений в режиме выпрямления, % | | 7,11 | 2,07 | 7,11 → 1,82 |
| Коэффициент гармонических искажений в режиме рекуперации, % | | 26,79 | 7,25 | 17,5 → 3,57 |
| Коэффициент пульсаций выходного напряжения, % | | 12,17 | 6,31 | 8,09 |

Выводы: Применение предложенных систем управления с двухканальной синусоидальной ШИМ и компенсационной двухканальной ШИМ позволит значительно улучшить энергетические показатели активных четырехквadrантных выпрямителей в режимах выпрямления и рекуперации. Установлено, что компенсационная ШИМ даже на пониженной частоте коммутации силовых ключей позволяет улучшить качество потребляемого из сети тока, повысить коэффициент мощности, снизить уровень пульсации напряжения в звене постоянного тока, а также 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. 5. Kwak, S. Design and rating comparisons of PWM voltage source rectifiers and active power filters for AC drives with unity power factor / S. Kwak and H.A. Toliyat // IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 5, pp. 1133-1142, Sept. 2005.

Bibliography (transliterated): 1. Ovchinikov, D.A., Kastrov M. Yu. (2002), Tryehfazniy vipryamitel' s korrektsiey 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 // Tehmchna elektrodinamka. Tem. vip. Silova elektronka 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. 5. Kwak, S. Design and rating comparisons of PWM voltage source rectifiers and active power filters for AC drives with unity power factor / S. Kwak and H.A. Toliyat // IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 5, pp. 1133-1142, Sept. 2005.

Поступила 10.07.2017