

КОМПЕНСАЦИОННЫЕ АКТИВНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

В роботі представлено систему керування трифазними компенсаційними активними випрямлячами, яка за рахунок синхронізації і зсуву опорних сигналів ШІМ в каналах управління окремих мостів забезпечує взаємну компенсацію вищих гармонік вхідних струмів та вихідної напруги, чим досягаються покращені показники електромагнітної сумісності з мережею живлення і ланкою постійного струму. Запропонований компенсаційний активний випрямляч реалізує режим корекції коефіцієнта потужності при зниженій частоті комутації (від 500 Гц), що в значній мірі знижує динамічні втрати в перетворювачі. Шляхом імітаційного моделювання досліджені показники електромагнітної сумісності компенсованих активних випрямлячів при варіації числа паралельних мостів та частоти ШІМ. Отримані аналітичні залежності спектру вищих гармонік вхідних струмів та вихідної напруги компенсаційних активних випрямлячів у функції частоти ШІМ, частоти живлячої мережі та числа мостів компенсаційного АВН. Бібл. 6, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: компенсаційні активні випрямлячі, корекція коефіцієнта потужності, широтно-імпульсна модуляція, електромагнітна сумісність, якість електроенергії.

В работе представлена система управления трехфазными компенсационными активными выпрямителями, которая путем синхронизации и сдвига опорных сигналов в каналах управления параллельных мостов обеспечивает взаимную компенсацию высших гармоник входных токов и выходного напряжения, чем реализуются высокие показатели электромагнитной совместимости с питающей сетью и звеном постоянного тока ($THD < 5\%$, $power\ factor > 99\%$, коэффициент пульсации $< 1\%$). Предложенная система управления позволяет реализовать коррекцию коэффициента мощности при пониженной частоте коммутации (от 500 Гц), что в значительной степени снижает динамические потери преобразователя. Путем имитационного моделирования исследованы показатели электромагнитной совместимости компенсационных активных выпрямителей при вариации числа параллельных мостов и частоты ШИМ. Получены аналитические зависимости спектра высших гармоник входных токов и выходного напряжения компенсационных активных выпрямителей в функции частоты питающей сети, частоты ШИМ и числа мостов компенсационного активного выпрямителя. Библи. 6, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: компенсационные активные выпрямители, коррекция коэффициента мощности, широтно-импульсная модуляция, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии.

Введение. Одной из основных задач силовой электроники является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) силовых выпрямителей с входными и выходными цепями. Актуальной является данная задача и для выпрямителей тяговых подстанций постоянного тока железных дорог и метрополитенов. Существующие шестипульсные и двенадцатипульсные выпрямители тяговых подстанций обладают рядом недостатков, среди которых: низкий коэффициент мощности, значительная эмиссия высших гармонических составляющих тока в питающую сеть переменного тока и высших гармоник напряжения в питаемую сеть постоянного тока, а также отсутствие возможности реализации двунаправленной передачи энергии. Вышеперечисленные факторы снижают энергоэффективность системы электроснабжения и обуславливают актуальность поиска путей улучшения электромагнитной совместимости (ЭМС) выпрямительных установок и реализации двунаправленной передачи энергии.

Постановка задачи. Существует достаточно много путей улучшения электромагнитной совместимости выпрямительных установок с питающей и питаемой сетью. Среди них стратегически отличаются два направления: создание новых выпрямительных преобразователей обеспечивающих более высокие показатели электромагнитной совместимости и модернизация существующих выпрямителей путей применения дополнительных технических устройств. Такими дополнительными техническими устройствами являются пассивные, активные и гибридные

фильтры, вольтодобавочные преобразователи и пр. Среди перспективных выпрямительных установок обеспечивающих более высокие показатели ЭМС являются активные выпрямители с коррекцией коэффициента мощности. При этом существует достаточно много вариантов схемотехнической реализации активных выпрямителей: одноключевые схемы, схема Виенна-выпрямителя, активные выпрямители тока и активные выпрямители напряжения (АВН) [1]. Преимуществом АВН среди прочих схем является: реализация синусоидальной формы входных фазных токов ($THD < 5\%$) с коэффициентом мощности близким к единице ($PF > 0,99$); реализация двунаправленной передачи энергии, а также возможность регулирования и стабилизации выходного напряжения.

Схема двухуровневого активного выпрямителя представлена на рис. 1.

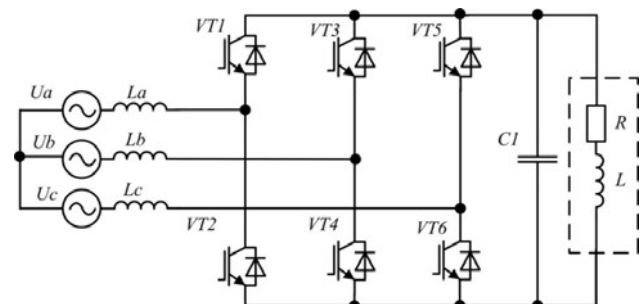


Рис. 1. Схема двухуровневого активного выпрямителя

Среди систем управления АВН наиболее распространёнными являются системы управления на основе гистерезисной модуляции [2] и ШИМ [3]. Значительным недостатком систем управления на основе гистерезисной модуляции является высокая и переменная частота модуляции (от десятков до сотни кГц), что значительно усложняет физическую реализацию при высоких мощностях. Таким образом, более предпочтительными являются системы управления на базе ШИМ. Не смотря на то, что АВН с ШИМ реализует режим коррекции коэффициент мощности с постоянной частотой значительно меньшей частоты ШИМ, он генерирует в питающую и контактную сеть высшие гармоники кратные частоте ШИМ. При этом для АВН с ШИМ характерным является следующий спектр высших гармоник фазных токов и выходного напряжения:

$$f_I = (f_{\text{ШИМ}} \pm 2f_{\text{СЕТИ}}) + (f_{\text{ШИМ}} \pm 4f_{\text{СЕТИ}}) + (2f_{\text{ШИМ}} \pm f_{\text{СЕТИ}}) + (2f_{\text{ШИМ}} \pm 5f_{\text{СЕТИ}}) + \dots, \quad (1)$$

$$f_U = (f_{\text{ШИМ}} \pm 3f_{\text{СЕТИ}}) + (f_{\text{ШИМ}} \pm 9f_{\text{СЕТИ}}) + 2f_{\text{ШИМ}} + (2f_{\text{ШИМ}} \pm 6f_{\text{СЕТИ}}) + \dots, \quad (2)$$

где f_U – спектр высших гармоник выходного напряжения; f_I – спектр высших гармоник входного тока; $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ; $f_{\text{СЕТИ}}$ – частота сети.

При этом двухуровневая схема АВН при применении в железнодорожной тяговой подстанции требует применения IGBT ключей 66-го класса, обладающие достаточно большими статическими и динамическими потерями. Одним из путей снижения нагрузочных требований ключей, улучшение качества электроэнергии и снижения динамических потерь в ключах является применение компенсационных активных выпрямителей. Поставленной задачей является представление структуры и системы управления компенсационных активных выпрямителей, а также результатов исследования реализуемых показателей ЭМС при вариации числа мостов и частоты модуляции.

Результаты исследований. Предложенные структуры компенсационных активных выпрямителей последовательного и параллельного типа приведены на рис. 2 и рис. 3. Число мостов компенсационных активных выпрямителей может быть различно.

Схемотехническая реализация параллельного соединения мостов в компенсационном активном выпрямителе позволяет получить эффект взаимной компенсации высших гармоник входных токов и выходных напряжений, чем достигается улучшение показателей качества электроэнергии.

Система управления компенсационного активного выпрямителя с двумя каналами управления приведена на рис. 5.

Система управления компенсационного активного выпрямителя повторяет систему управления двухуровневого моста АВН с ШИМ, однако имеет несколько засинхронизированных каналов управления (свой канал управления на каждый мост). Синхронизация каналов управления со сдвигом опорных сигналов ШИМ на угол ψ позволяет обеспечить взаимную

компенсацию высших гармоник фазных токов отдельных мостов и высших гармоник в общем выходном напряжении. При этом угол сдвига для обеспечения режима компенсации высших гармоник должен быть равен $\psi = 360^\circ/n$, где n – число мостов компенсационного АВН.

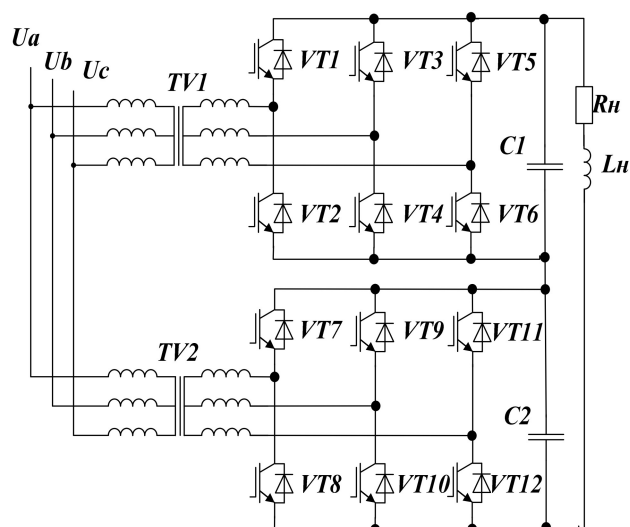


Рис. 3. Компенсационный активный выпрямитель последовательного типа

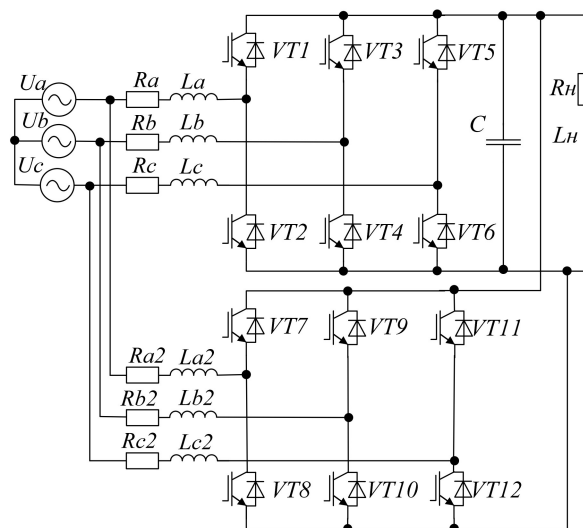


Рис. 4. Компенсационный активный выпрямитель параллельного типа

Для подтверждения реализации эффекта компенсации высших гармоник и получения улучшенных показателей электрической энергии предложенной системой управления компенсационных активных выпрямителей в пакете Matlab был создан ряд имитационных моделей компенсационных АВН с различным числом мостов и работающих на различной частоте ШИМ. Число мостов варьировалось от 2 до 4, частота модуляции варьировалась от 500 Гц до 2 кГц. Имитационная модель компенсационного активного выпрямителя с двумя мостами приведена на рис. 6.

Полученные на имитационной модели осциллограммы фазных токов двух мостов и результирующего фазного тока приведены на рис. 7.

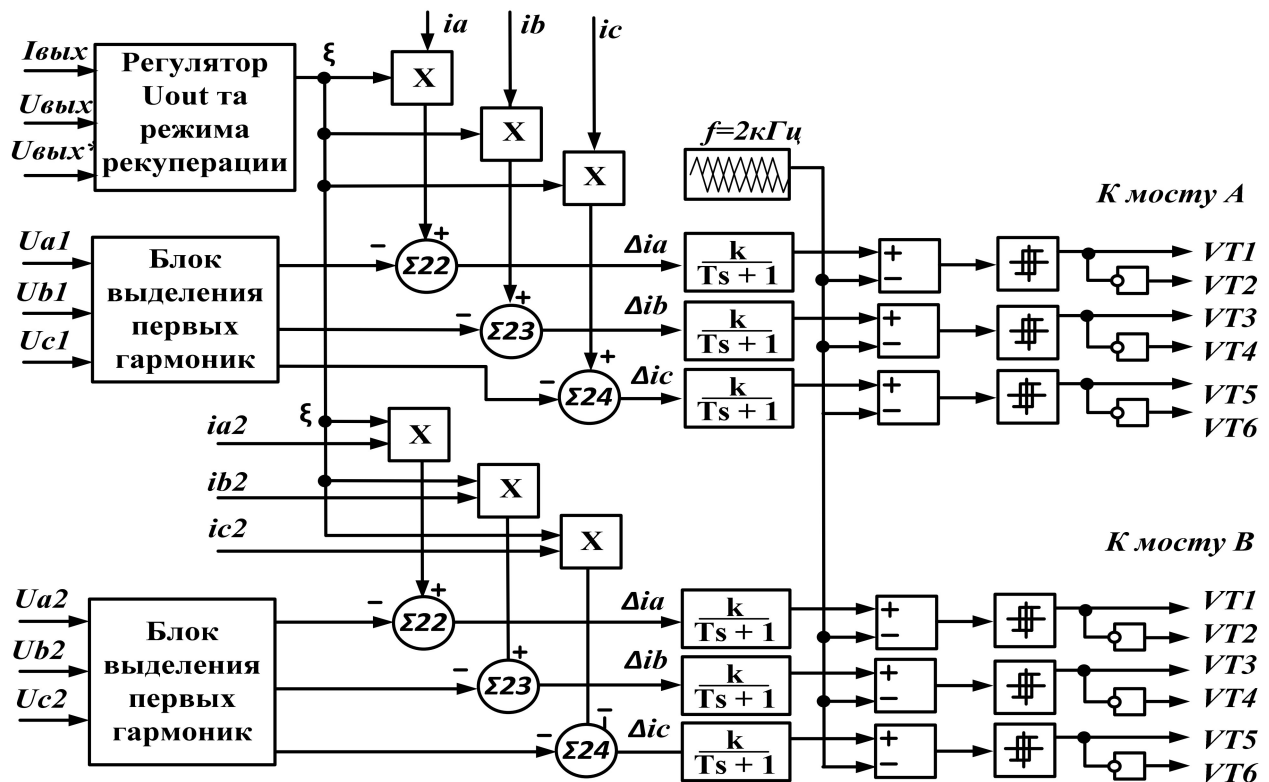


Рис. 5. Система управления компенсационного активного выпрямителя с двумя мостами

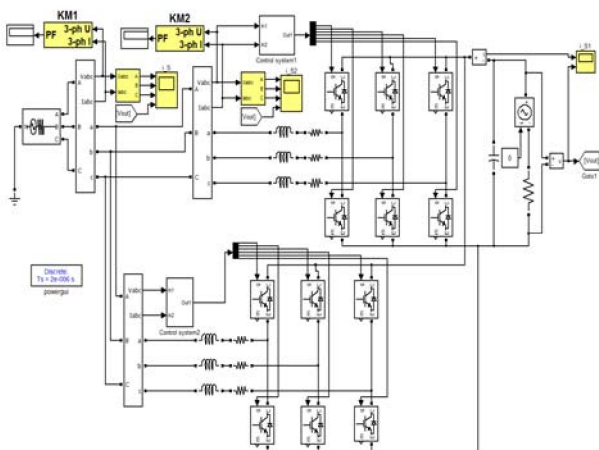


Рис. 6. Имитационная модель компенсационного АВН с двумя параллельными мостами

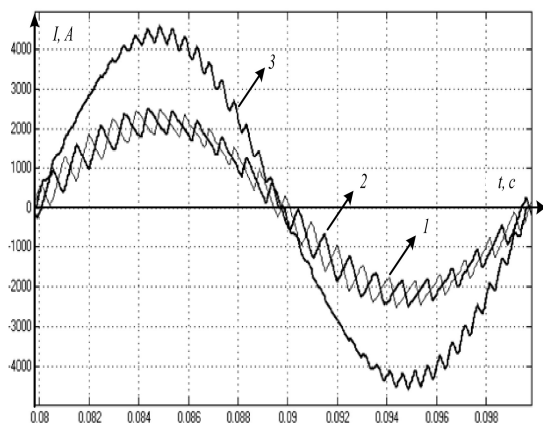


Рис. 7. Осциллограммы фазных токов компенсационного АВН с двумя параллельными мостами: 1 – общий потребляемый ток; 2,3 – фазные токи двух мостов

Фурье-анализ фазного тока одного моста компенсационного АВН приведен на рис. 8 и на рис. 9 приведен фурье-анализ высших гармоник результирующего фазного тока.

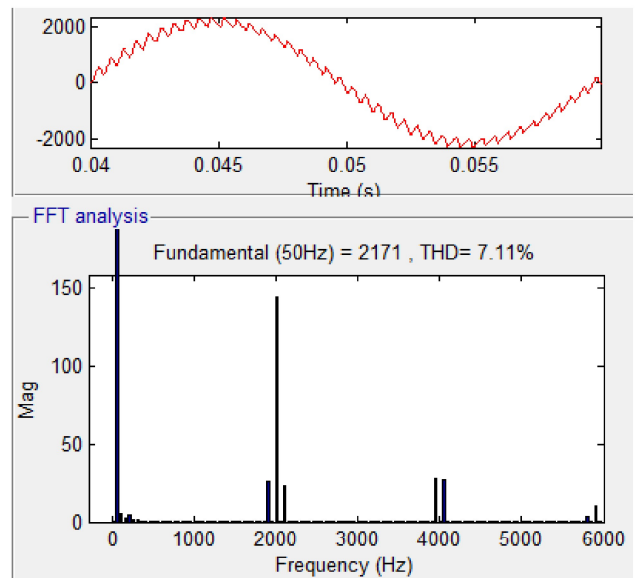


Рис. 8. Фурье-анализ фазного тока одного моста компенсационного АВН при частоте ШИМ 2кГц

Как видно из рис. 7-9 сдвиг опорных сигналов ШИМ в компенсационном АВН позволяет улучшить коэффициент гармонических искажений (THD) фазного тока и компенсировать гармоники нечетные частоте ШИМ.

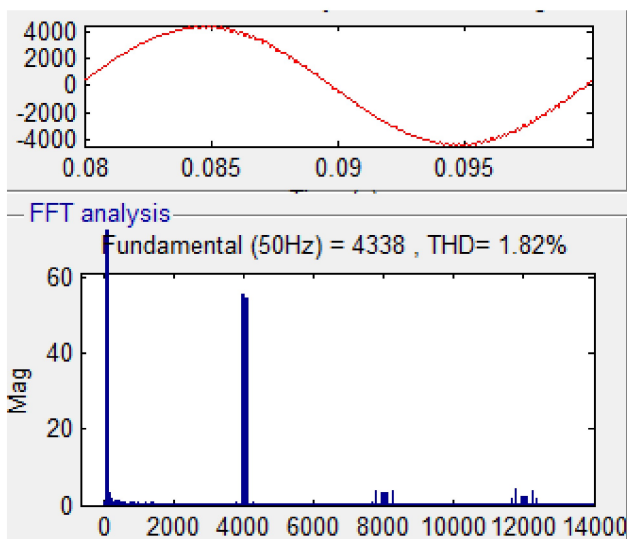


Рис. 9. Фурье-анализ общего потребляемого тока компенсационного АВН при частоте ШИМ 2кГц

Следует отметить, что при увеличении числа мостов в компенсационном активном выпрямителе эффект компенсации высших гармоник усиливается. Осциллограммы фазных токов компенсационного АВН с 4 мостами приведены на рис. 10.

Полученные в ряде имитационных экспериментов результаты реализованных параметров электромагнитной совместимости приведены в табл. 1.

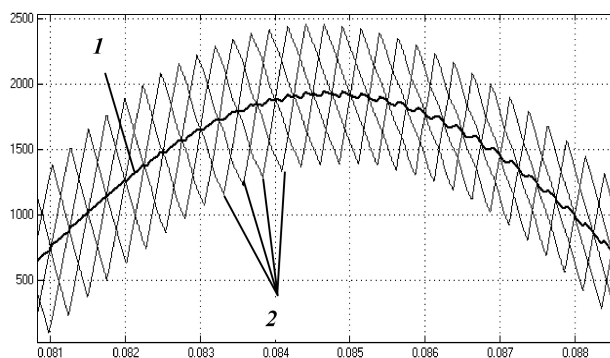


Рис. 10. Осциллограммы фазных токов компенсационного АВН с четырьмя параллельными мостами: 1 – общий потребляемый ток; 2 – фазные токи четырех мостов

Таким образом, при синхронизации систем управления нескольких активных выпрямителей работающих на одну сеть и реализации взаимного сдвига их опорных сигналов ШИМ возможно получить значительное улучшение параметров электроэнергии и возможность снижения частоты коммутации, чем будет достигнуто снижение динамических потерь.

Таблица 1

Параметры электромагнитной совместимости компенсационных активных выпрямителей при вариации числа мостов и частоты коммутации

Показатели	Значение								
	0,5			1		2			
Частота коммутации, кГц	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Число мостов	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Коэффициент мощности, %	99,48	99,59	99,62	99,57	99,63	99,69	99,59	99,64	99,72
THD фазного тока одного моста, %	27,91	37,94	46,23	9,06	19,52	23,73	7,11	9,85	12,73
THD общего фазного тока, %	7,03	3,45	1,48	2,82	1,75	0,8	1,82	0,89	0,44
Коэффициент пульсации $U_{вых}$, %	0,741	0,351	0,169	0,368	0,178	0,084	0,185	0,091	0,043

Выводы.

1. В статье представлена структура компенсационных активных выпрямителей и их система управления на базе ШИМ, обеспечивающие реализацию коэффициента мощности близкого к единице, активное формирование формы фазного тока близкой к синусоиде, а также двунаправленную передачу энергии. Компенсационные активные выпрямители за счет синхронизации опорных сигналов ШИМ обеспечивают взаимокompенсацию высших гармоник входного тока и выходного напряжения, чем достигаются улучшение показателей качества электроэнергии и возможность реализации меньшей частоты коммутации.

2. Система управления компенсационных активных выпрямителей может быть использована как в одном преобразователе, состоящем из нескольких мостов, так и в нескольких активным выпрямителях установленных удаленно друг от друга, работающих параллельно на одну сеть и имеющих синхронизацию каналов управления со сдвигом опорных сигналов ШИМ на соответствующий угол.

3. В работе приведены результаты моделирования ряда систем компенсационных активных выпрямителей, показывающих, что при увеличении числа мостов компенсационного активного выпрямителя качество электроэнергии значительно увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плахтий А. А. Обзор схем трехфазных активных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности для тяговых подстанций постоянного тока / А. А. Плахтий // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків: УкрДАЗТ. – 2013. – вип. 142. – С. 144-150.
2. Плахтий А. А. Гистерезисная система управления активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности / А. А. Плахтий // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК. – 2013. – №4 (449). – С. 82-88.
3. Плахтий А. А. Анализ энергетических характеристик трехфазного активного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности при работе с постоянной частотой модуляции / А. А. Плахтий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №12(1121). – С. 430-434.
4. Hou C-C. A Multicarrier PWM for Parallel Three-Phase Active Front-End Converters, IEEE Trans Power Electron 2013; 28(6):2753-2759. doi: 10.1109/ECCE.2011.6064324.
5. C.-T. Pan and Y.-H. Liao, "Modeling and control of circulating currents for parallel three-phase boost rectifiers with different load sharing," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 7, pp. 2776-2785, July 2008. doi: 10.1109/tie.2008.925647.
6. C.-C. Hou and P.-T. Cheng, "A multi-carrier pulse width modulator for the auxiliary converter and the diode rectifier", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 4, pp. 1119-1126, April 2011. doi: 10.1109/tpe.2010.2098050.

REFERENCES

1. Plakhtiy A.A. Overview of three-phase active rectifiers with power factor correction for DC traction substations. *Zbirnyk naukovih prac UrkDUZT*, 2013, no.142, pp. 144-150. (Rus).
2. Plakhtiy A.A. Hysteresis control system of active three-phase rectifier with power factor correction. *Zbirnyk naukovih prac NUK*, 2013, no.4(449), pp. 82-88. (Rus).
3. Plakhtiy A.A. Analysis of the energy characteristics of a three-phase rectifier with active power factor correction when dealing with a constant modulation frequency. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2015, no.12(1121), pp. 430-434. (Rus).
4. Hou C-C. A Multicarrier PWM for Parallel Three-Phase Active Front-End Converters, *IEEE Trans Power Electron* 2013; 28(6):2753-2759. doi: **10.1109/ecce.2011.6064324**.
5. C.-T. Pan and Y.-H. Liao, "Modeling and control of circulating currents for parallel three-phase boost rectifiers with different load sharing," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2776-2785, July 2008. doi: **10.1109/tie.2008.925647**.
6. C.-C. Hou and P.-T. Cheng, "A multi-carrier pulse width modulator for the auxiliary converter and the diode rectifier" *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1119-1126, April 2011. doi: **10.1109/tpel.2010.2098050**.

Поступила (received) 11.07.2016

*Плахтий Александр Андреевич, ассистент,
Украинский государственный университет
железнодорожного транспорта,
65044, Харьков, пл. Фейербаха, 7,
тел/phone +38 093 9176020,
e-mail: 83et@mail.ru; a.plakhtiy1989@gmail.com*

A.A. Plakhtiy

*Ukrainian state university of railway transport,
7, Feirbaha sq., Kharkiv, 61000, Ukraine.*

Compensated active rectifiers with power factor correction.

Purpose. *The proposed control system of compensated active rectifiers in DC traction substations allow to improve the power quality, provide bidirectional electric power transmission and to implement the regulation and stabilization of the output voltage.*

Methodology. *Simulation modeling of the proposed compensated active rectifiers with proposed control system shows: the waveform of the phase current and voltage, output voltage in rectifier and recovery mode. The models take into account the parameters of the mains supply, inverter parameters, load and features of designed control system. Results.* *The simulation of compensated active rectifier with the proposed control system with a different number of bridges and varying of modulation frequency demonstrated improvement of power quality parameters, such as: total harmonic distortion (THD), power factor, the ratio of the output voltage ripple ratio. Synchronization and shifting of PWM reference signals in control channels of individual bridges provides mutual compensation of the higher harmonics in input current and output voltage. Originality.* *The proposed control system of compensated active rectifier allows providing compensation of input currents harmonic and output voltage harmonic, thus achieving improvements of power quality and the possibility of bi-directional transmission of electrical power. Practical value.* *Application of compensated active rectifiers in DC traction substations can significantly improve electromagnetic compatibility and improve the energy efficiency of the power supply system. References 6, tables 1, figures 10.*

Key words: **compensated active rectifiers, power factor correction, pulse width modulation, electromagnetic compatibility and power quality.**