

УДК. 621.314.

**Я. В. Щербак**, д-р техн. наук,  
**А. А. Плахтий**,  
**М. В. Цеховской**, канд. техн. наук

### УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

*Аннотация.* Предложены структуры преобразователей частоты, содержащие двух- и трехуровневые активные выпрямители с коррекцией коэффициента мощности. Выполнены исследования предложенной структуры. Предложенные структуры преобразователей частоты позволяют реализовать низкое содержание высших гармонических составляющих фазных токов, коэффициент мощности, близкий к единице, а также возможность реализации рекуперации.

*Ключевые слова:* частотный преобразователь, активный выпрямитель, коррекция коэффициента мощности, электромагнитная совместимость

**Ya. V. Shcherbak**, ScD.,  
**A. A. Plakhtiy**,  
**M. V. Tsekhovskoy**, PhD.

### IMPROVEMENT OF POWER SUPPLY ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF FREQUENCY CONVERTERS BY APPLICATION OF ACTIVE RECTIFIERS

*Abstract.* The article proposed a structure of the frequency converter, comprising a three-level active rectifier with power factor correction. The investigations of proposed structure were performed. The proposed structure allows realizing a frequency converter with low content of higher current harmonic, unity power factor, as well as the possibility of implementing energy recovery.

*Keywords:* inverter, active rectifier, power factor correction, electromagnetic compatibility

**Я. В. Щербак**, д-р техн. наук,  
**О. А. Плахтий**,  
**М. В. Цеховський**, канд. техн. наук

### ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ АКТИВНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

*Анотація.* Запропоновані структури перетворювачів частоти, що містять дво- та трирівневі активні випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності. Виконані дослідження запропонованої структури. Запропоновані структури дозволяють реалізувати частотні перетворювачі з низьким вмістом вищих гармонійних складових, коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці, а також з можливістю реалізації рекуператії.

*Ключові слова:* частотний перетворювач, активний випрямляч, корекція коефіцієнту потужності, електромагнітна сумісність

#### Введение

Преобразователи частоты (далее ПЧ) являются мощными источниками высших гармоник тока в сеть. В связи с ужесточением требований государственных и международных стандартов (ГОСТ 51317.3.12-2006, IEC 61000-3-14, IEC-555, IEEE-519) к эмиссии гармонических составляющих токов, потребляемых техническими средствами, актуальным является вопрос снижения эмиссии высших гармоник тока и повышения коэффициента мощности. Вторым актуальным вопросом является реализация структуры ПЧ с рекуперацией энергии от двигателя в сеть с высоким качеством рекуперированной энергии. Одним из вариантов решения поставленных задач является применение активных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности. Особенности схем активных выпрямителей являются: возможность

реализации синусоидальной формы входных фазных токов с коэффициентом мощности, близким к единице, возможность реализации рекуперации, регулирование выходного напряжения выше фазного напряжения сети.

**Цель работы** – анализ уровня эмиссии высших гармонических составляющих преобразователя частоты применением двух- и трехуровневых активных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности.

#### 1. Частотный преобразователь с диодным выпрямителем

Наиболее распространенной является схема ПЧ с трехфазным диодным выпрямителем и автономным инвертором напряжения [1]. Существенными недостатками данной схемы являются: высокий уровень эмиссии высших гармоник тока, отсутствие возможности регулирования уровня напряжения в звене постоянного тока, отсутствие возможности реализации рекуперации. Структурная схема ПЧ с диодным выпрямителем представлена на рис. 1. Применение

тиристорных выпрямительных схем решает задачу регулирования напряжения в звене постоянного тока, однако не решает проблему эмиссии гармоник тока.

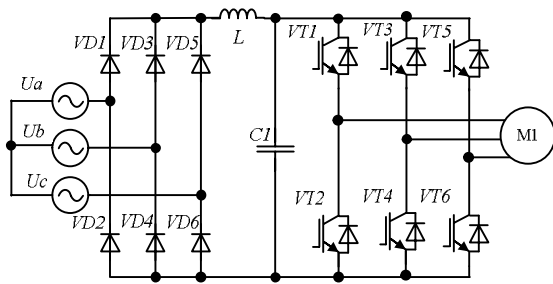


Рис. 1. Структурная схема преобразователя частоты с диодным выпрямителем

Высокий уровень эмиссии высших гармоник ПЧ ведет к необходимости применения дополнительных входных фильтров, которые повышают стоимость и массогабаритные показатели ПЧ.

**2. Частотный преобразователь с активным выпрямителем**

Схема ПЧ с активным выпрямителем напряжения (далее АВН) и автономным инвертором напряжения (далее АИН) собирается на полностью запираемых вентилях [2, 3]. Системы управления АВН и АИН работают по системе векторного управления. Силовая схема АВН совпадает со схемой АИН, но работающего в обратном режиме. Частотный преобразователь благодаря возможности работы АВН как в режиме активного выпрямителя, так и в режиме рекуперации обеспечивает реализацию коэффициента мощности близкого к единице, форму потребляемого тока, близкую к синусоиде, с коэффициентом нелинейных искажений тока менее 3 %, а также реализацию – двунаправленного потока электроэнергии между питающей сетью и двигателем. Структурная схема ПЧ на базе двухуровневого АВН-АИН представлена на рис. 2.

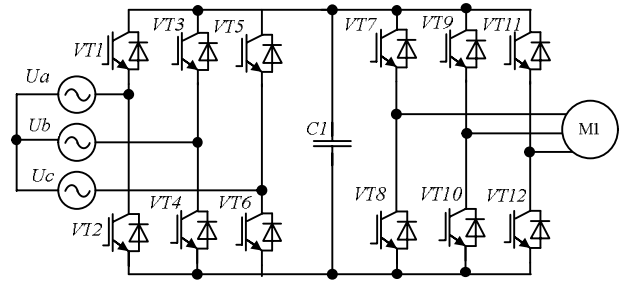


Рис. 2. Структурная схема преобразователя частоты с двухуровневым активным выпрямителем

При реализации ПЧ с двухуровневой структурой АИН-АВН характерны высокие нагрузочные требования к ключам. Для снижения нагрузочных требований к ключам схемы возможна реализация трехуровневой структуры АВН-АИН. При реализации трехуровневой структуры АВН-АИН не только позволяет уменьшить рассеиваемую на ключах мощность, но также снизить коэффициент нелинейных искажений фазного тока.

Трехуровневая структура ПЧ на базе АВН-АИН представлена на рис. 3.

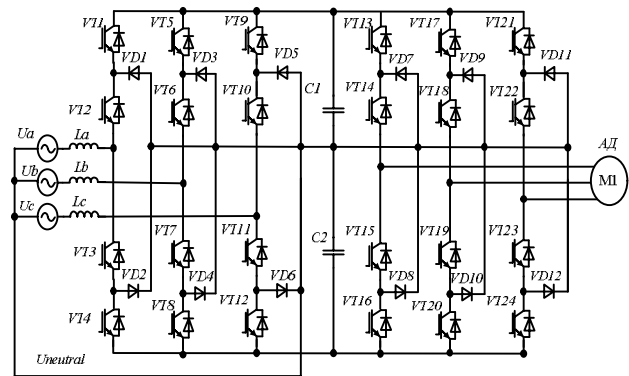


Рис. 3. Трехуровневая структура преобразователя частоты с активным выпрямителем

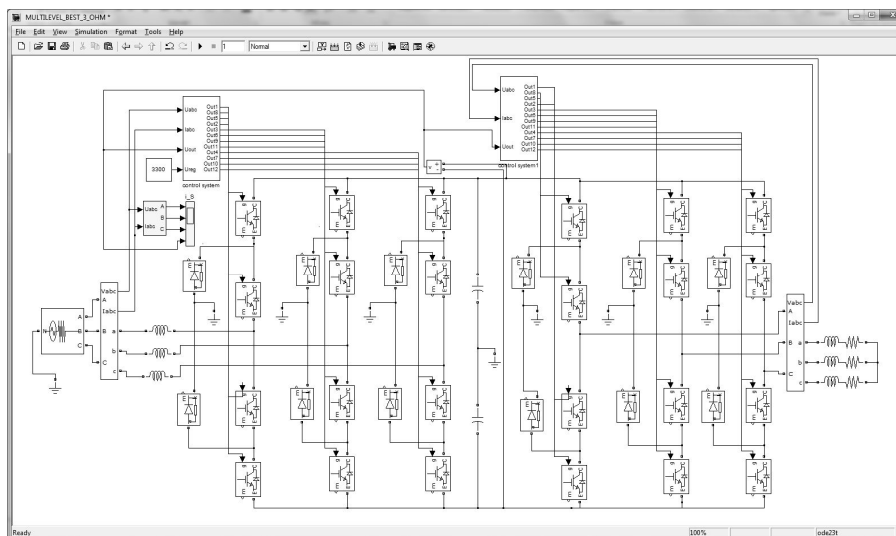


Рис. 4. Иммитационная модель MATLAB ПЧ на базе трехуровневой структуры АВН-АИН

### 3. Имитационное моделирование

Для проведения анализа эмиссии высших гармоник тока ПЧ с двух- и трехуровневым выпрямителем в программе Matlab были построены имитационные модели ПЧ на базе двух- и трехуровневых структур АВН-АИН. Модель трехуровневой структуры приведена на рис. 4.

Параметры имитационной модели ПЧ:

- фазное напряжение сети 320 В;
- индуктивность входных дросселей 2 мГн;
- напряжение в звене постоянного тока 3200 В;
- емкость в звене постоянного тока 6 мкФ;
- нагрузка АИН  $R=10\ \text{Ом}$ ;  $L=0,1\ \text{Гн}$ ;
- частота ШИМ 10кГц.

Форма входных фазных напряжений и токов приведена на рис. 4. Форма напряжения и тока в звене постоянного тока ПЧ представлена на рис. 5.

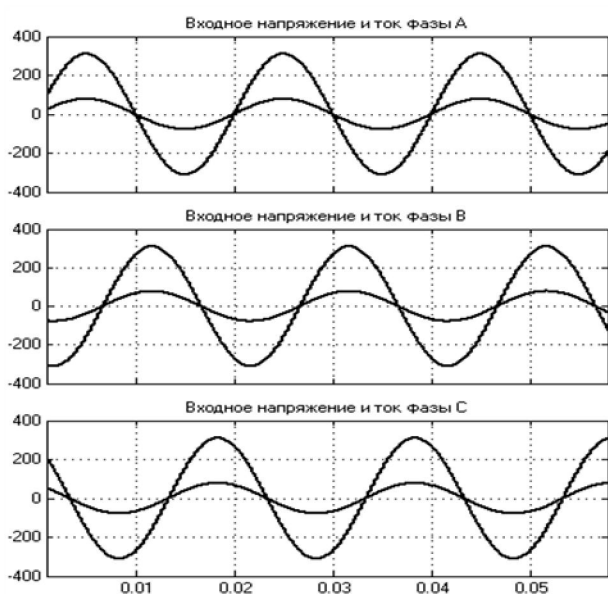


Рис. 4. Форма входных фазных токов и напряжений АВН

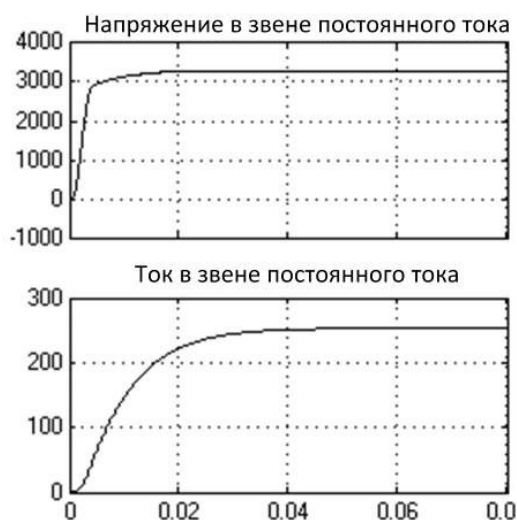


Рис. 5. Напряжение и ток в звене постоянного тока преобразователя частоты

Результаты проведенного анализа имитационного моделирования двух- и трёхуровневых структур АВН-АИН приведены в табл. 1.

#### 1. Энергетические показатели

Параметр	2-х уров. АИН-АВН	3-х уров. АИН-АВН
Коэффициент мощности энергии потребляемой из сети	98,78 %;	99,34 %;
Коэффициент нелинейных искажений входных фазных токов	1,053 %	0,61 %;
Коэффициент пульсаций напряжения в звене постоянного тока:	0,425 %	0,2471 %
Коэффициент мощности в режиме рекуперации	- 98,2 %	- 98,78%
Коэффициент нелинейных искажений фазного тока АИН в режиме ШИМ	4,07 %	4,07 %
Мощность, рассеиваемая одним ключом АВН, кВт*ч	0,66	0,33

**Выводы.** Применение активных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности позволит значительно повысить электромагнитную совместимость преобразователей частоты с питающей сетью и реализовать коэффициент потребляемой мощности, близкий к единице. Проведен анализ эмиссии гармоник тока частотных преобразователей с применением двух-и трехуровневых активных трехфазных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности. Трехуровневые активные выпрямители имеют ряд преимуществ по сравнению с двухуровневыми: повышенный коэффициент мощности, потребляемой из сети, меньший уровень эмиссии высших гармоник тока, а также меньшие требования по нагрузке к ключам.

Получено 15.07.2014

Список использованной литературы:

1. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники [Текст] / Ю. К. Розанов.– М. : Энергоатомиздат, 1992, 296 с
2. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст] / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН. – 2000. – С.. 273 – 288.
3. Пронин М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) : под ред. Крутякова Е. А. / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов. – СПб : Электросила, 2003. – 172 с.
4. Celanovic N., and Boroyevich D., (2000). A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problems in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source Inverters *IEEE Trans on Power Electronics*, Vol. 15, No. 2, March, pp. 242 – 249.

5. Mao H., Boroyevich D., and Lee F.C., (1998), Novel Reduced-Order Small Signal Model of a Three-Phase PWM Rectifier and its Application in Control Design and System Analysis *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 13, pp. 511 – 531.

6. Mao H., Boroyevich D., and Ravindra A., (1996), Analysis and Design of a High Frequency Three-Phase Boost Rectifier *IEEE Applied Power Electronics Conference*, Vol. 4, pp. 538 – 544.

7. Maswood A.I., and Fangrui Liu, (2005), A Novel Variable Hysteresis Band Current Control of Three-Phase Three-Level Rectifier with Constant Switching Frequency *IEEE, Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 1, pp. 23 – 27.

8. Walker G., and Ledwich G., (1999), Bandwidth Considerations for Multilevel Converters, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 74 – 81.

9. Lai J. S., and Peng F. Z., (1996), Multilevel Converters A New Breed of Power Converters *IEEE Trans. Ind. Applic.*, Vol. IA-32, No. 3, pp. 509 – 517.

10. Dai M., Marwali M.N., Jung J.-W., and Keyhani A. (2005). A PWM Rectifier Control Technique for three-phase Double Conversion ups under Unbalanced Load *IEEE Applied Power Electronics Conf. Expo. (APEC)*, Vol. 1, pp. 548–552.

Получено 15.07.2014

#### References

1. Ruzakov Yu.K. *Osnovi silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics], (1992), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 296 p. (In Russian).

2. Shreyner R.T., *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovimi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical Modeling of AC Drives with Semiconductor Frequency Converters], (2000), Ekaterinburg, Russian Federation, *URO RAN*, pp. 273 – 288 (In Russian).

3. Pronin M.V., and Vorontsov A.G., *Silovie polnost'yu upravlyaemie poluprovodnikovie preobrazovately. Modelirovanie i raschet*, [Completely Controllable Semiconductor Power Converters (Modeling and Calculation)], (2003), *Spb. Electropower*, 173 p. (In Russian).

4. Celanovic N., and Boroyevich D., (2000), A Comprehensive Study of Neutral-Point Voltage Balancing Problems in Three-Level Neutral-Point-Clamped Voltage Source Inverters, *IEEE Trans on Power Electronics*, Vol. 15, No. 2, March, pp. 242 – 249.

5. Mao H., Boroyevich D., and Lee F.C. (1998), Novel Reduced-Order Small Signal Model of a three-phase PWM Rectifier and its Application in Control Design and System Analysis, *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 13, pp. 511 – 531.

6. Mao H., Boroyevich D., and Ravindra A., (1996), Analysis and Design of a High Frequency Three-Phase Boost Rectifier *IEEE Applied Power Electronics Conference*, Vol. 4, pp. 538 – 544.

7. Maswood A.I., and Fangrui Liu, (2005), A Novel Variable Hysteresis Band Current Control of Three-Phase

Three-Level Rectifier with Constant Switching Frequency, *IEEE, Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 1, pp. 23 – 27.

8. Walker G., and Ledwich G., (1999). Bandwidth Considerations for Multilevel Converters, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 74 – 81.

9. Lai J.S., and Peng F.Z., (1996), Multilevel Converters a New Breed of Power Converters *IEEE Trans. Ind. Applic.*, Vol. IA-32, No. 3, pp. 509 – 517.

10. Dai M., Marwali M.N., Jung J.-W., and Keyhani A., (2005), A PWM Rectifier Control Technique for Three-Phase Double Conversion ups under Unbalanced Load *IEEE Applied Power Electronics Conf. Expo. (APEC)*, Vol. 1, pp. 548 – 552.



Щербак  
Яков Васильевич,  
д-р техн. наук, проф. зав. каф.  
автоматизированных системы  
электрического транспорта  
Украинской госуд. академии  
железнодорожного  
транспорта.  
61007, г. Харьков  
пл. Фейербаха 7.  
Тел: +38 (096) 2208996.  
E-mail: sherbak47@mail.ru



Плахтий  
Александр Андреевич,  
аспирант каф.  
автоматизированных систем  
электрического транспорта  
Украинской госуд. академии  
железнодорожного транспорта.  
61007, г. Харьков  
пл. Фейербаха 7.  
Тел: +38 (093) 9176020.  
E-mail: 83et@mail.ru



Цеховской  
Максим Владимирович,  
канд. техн. наук, руководитель  
проектов ООО «ВО ОВЕН».  
61007, г. Харьков, ул.  
Гвардейцев-широнивцев,3А.  
Тел: +38 (067) 573-4581.  
E-mail: m.tsekhovskoy@owen.ua