

# ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ В СОСТАВЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Чернецов П.О., Дзалиев С.В., Патанов Д.А., Тихомиров И.С.

(Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет,  
Санкт-Петербург, Россия, [pavel@chernetsov.ru](mailto:pavel@chernetsov.ru))

## Abstract

In this article the investigation of a rectifier with Power Factor Correction for using in converters for induction heating is described. Three-phase high power factor scheme "Vienna" with less power switches are presented to perform an input current control and dc-link voltage regulation. The structure has a common capacitive center point that allows the three-level operation and a low blocking-voltage stress on the power switches (half of dc link voltage). The reduction of blocking voltage allows the use of low cost and low losses power devices, increasing the efficiency and the power density with reduced production cost. An energy characteristic of AR with different output voltage values is described.

## Введение

Пересмотр норм качества электроэнергии [1, 2] привел к тому, что применяющиеся практически во всех преобразователях для привода и для электротехнологий трехфазные мостовые выпрямители, как управляемые, так и неуправляемые, перестали удовлетворять новым требованиям по электромагнитной совместимости с питающей сетью. Современный путь решения проблемы электромагнитной совместимости – применение активных выпрямителей – ключевых преобразователей, потребляющих из сети почти синусоидальный ток.

Трехфазные активные выпрямители сетевого напряжения 380В являются АС-DC преобразователями повышающего типа с регулируемым уровнем выходного напряжения в диапазоне от 600 В и выше. Оптимальный уровень номинального выходного напряжения активного выпрямителя в составе высокочастотного преобразователя для индукционного нагрева («рабочая точка») определяется как показателями качества самого выпрямителя, так и оптимальным уровнем напряжения питания транзисторного высокочастотного инвертора, который позволяет минимизировать конструкцию высокочастотного инвертора и повысить надежность его работы.

Применение регулируемых активных выпрямителей в преобразователях частоты для индукционного нагрева дает дополнительный канал регулирования и расширяет возможности согласования с переменной индукционной нагрузкой.

Разнообразные схемы трехфазных активных выпрямителей отличаются числом полупроводниковых приборов, уровнем их напряжений и токов и рядом других показателей. Практически, наиболее удачной является схема, показанная на рис. 1, которая получила в литературе название “Vienna” [3, 5]. Достоинства выпрямителя типа “Vienna”, которые определяют его широкое использование, являются: минимальное количество силовых управляемых ключей, минимальное значение индуктивности запасующих дросселей, низкий уровень напряжения на полупроводниковых приборах, не превышающий половины выходного напряжения выпрямителя.

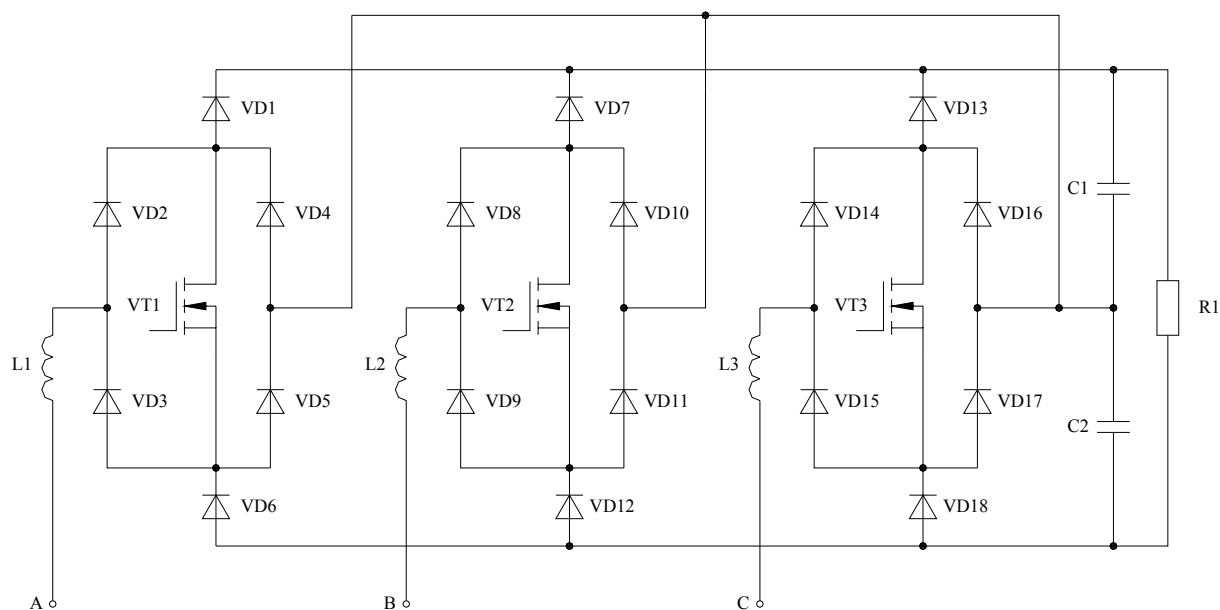


Рис. 1. Схема активного выпрямителя “Vienna”

Данная работа посвящена обоснованию выбора «рабочей точки» активного выпрямителя типа “Vienna” в источниках питания установок индукционного нагрева.

### Выбор выходного напряжения АВ

Амплитуда напряжения на транзисторах в инверторе напряжения равна выходному напряжению выпрямителя и при питании от нерегулируемого трехфазного мостового выпрямителя составляет 500В. Ввиду наличия коммутационных всплесков напряжения, которые реально удастся ограничить на уровне 1.2 – 1.3 от амплитуды, коэффициент запаса по напряжению для транзисторов должен составлять 1.5 – 1.6, т.е. оптимальным классом по напряжению силовых транзисторов инвертора является восьмой класс (800В).

Мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ), применяемые в инверторах, выпускаются на напряжения 600, 1200 и 1700В. Несоответствие между классом выпускаемых транзисторов и оптимальным классом для работы в инверторе с питанием от трехфазного диодного

выпрямителя, приводит к существенному недоиспользованию транзисторов по напряжению (в 1.5 раза) и, как следствие, к ухудшению массо-объемных показателей преобразователя.

Питание инвертора напряжением 750 – 800В или 1100 – 1150В позволило бы оптимально использовать силовые транзисторы 12 и 17 классов по напряжению.

Использование активного выпрямителя с повышенным уровнем выходного напряжения может решить эту проблему, однако для обоснованного выбора номинального выходного напряжения необходимо оценить эффективность режима работы выпрямителя для различных уровней выходного напряжения.

### **Исследование характеристик активного выпрямителя при изменении уровня заданного выходного напряжения**

Алгоритм управления регулирования АВ описан в [3]. Увеличение выходного напряжения достигается путем увеличения интервалов проводимости силовых транзисторах. При этом увеличивается высокочастотная составляющая токов транзисторов и сетевых токов. Это приводит к увеличению искажения сетевого напряжения и потерь в сети и в силовых транзисторах.

На рис. 2 изображены зависимости коэффициента гармонических искажений (ТНД), рассчитанный до 50-ой гармоники, а также нормированных токов гармоник с номерами 5, 7, 11, 13 от заданного уровня выходного напряжения при постоянной мощности в нагрузке. Расчет произведён на модели в среде MatLab – Simulink®. На уровне 500В представленные значения ТНД и токов гармоник соответствуют режиму неуправляемого выпрямителя.

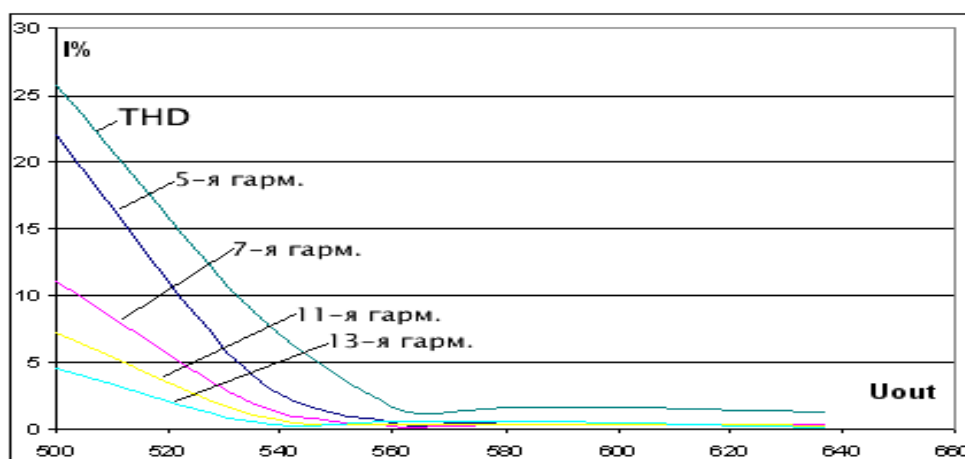


Рис. 2.

При повышении выходного напряжения (расчет произведен при постоянной мощности АВ, т.е. более высокому выходному напряжению

соответствует большее значение сопротивления нагрузки) происходит снижение уровня канонических гармоник, и уже при напряжении 560В, все канонические гармоники не превышают уровней, определяемых стандартами, например, IEEE 519-1992 [4].

Для оценки ограничения сверху на уровень выходного напряжения на модели исследованы зависимости показателей энергетической эффективности и электромагнитной совместимости (ЭМС) с питающей сетью при вариации выходного напряжения от 600 до 1100 В при постоянной мощности.

На рис. 3. изображены нормированные относительно первой гармоники значения токов гармоник при различном выходном напряжении. Из графика следует, что сетевой ток включает канонические гармоники, ток на частоте работы силовых транзисторных ключей АВ (25 кГц – 500-я гармоника) и токи кратных частот. Уровень канонических гармоник в рассмотренном диапазоне изменения выходного напряжения практически постоянен (порядка 1%) и удовлетворяет требованиям по ЭМС с питающей сетью. Уровень тока на частоте работы транзисторов АВ растет от значения 3,5% до 4,5%, а кратная ей 1000-я гармоника растет от 2% до 5,5%. Эти высокочастотные составляющие сетевого тока могут быть легко снижены фильтрами до требуемого уровня.

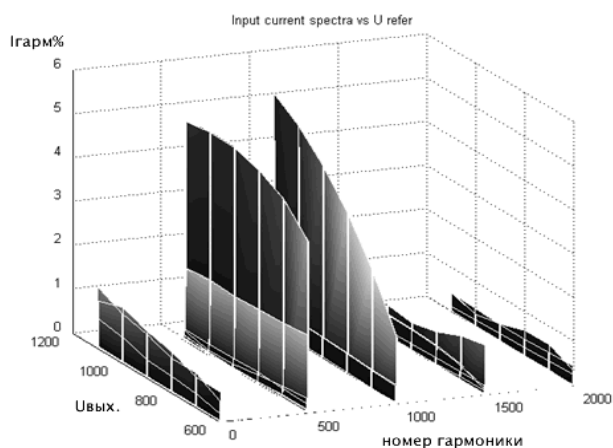


Рис. 3.

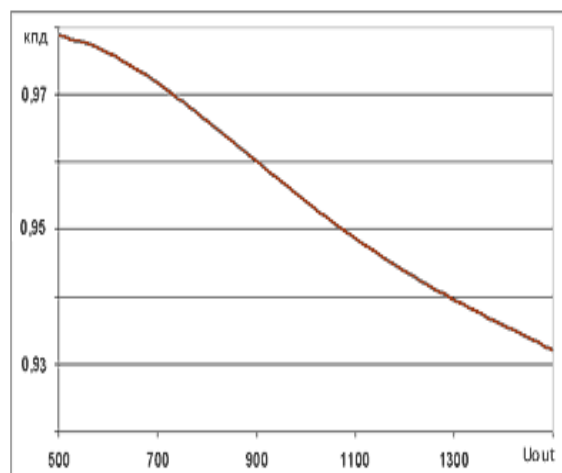


Рис. 4.

На рис.4 изображена зависимость КПД АВ от выходного напряжения, рассчитанная при постоянной мощности в нагрузке. КПД АВ при выходном напряжении 700В составляет 97%, а при напряжении 1100В – 95%. При этом диодный выпрямитель на тех же приборах имеет КПД 98%.

Незначительное снижение КПД выпрямителя при работе на повышенном напряжении является той ценой, которую необходимо заплатить за новые качественные характеристики – удовлетворение требований ЭМС, оптимальное использование силовых транзисторов инвертора и расширение регулировочных возможностей преобразователя.

## **Заключение**

На основании полученных данных можно сделать вывод, что АВ “Vienna” достаточно эффективен в преобразователях для индукционного нагрева, обеспечивает ЭМС с питающей сетью, оптимальное согласование по напряжению выпрямителя и инвертора и дополнительный канал регулирования мощности.

## **Литература**

1. Induction installation for soldering copper buses of power turbo-generator rotors. / S. Dzliev, D. Patanov, K. Kozlov, P. Chernetsov, I. Pozniak. // Proceedings of the International Seminar on Heating by Internal Sources, Padua, September 12-13-14, 2001.
2. Чернецов П.О. Тенденции развития источников питания для электротехнологий. Опыт разработки транзисторных генераторов для индукционного нагрева.// “Энергосбережение в электротехнологии” материалы междунар. научн. - техн. конф. Изд-во ТГТУ 2001.
3. Kolar J.W., Ertl H., Zach F.C. Design and Experimental Investigation of a Three-Phase High Power Density High Efficiency Unity Power Factor PWM (Vienna) Rectifier Employing a Novel Integrated Power Semiconductor Module. Proceedings of the 11th IEEE Applied Power Electronics Conference, San Jose (CA), USA, March 3-7, Vol.2, pp.514-523 (1998).
4. IEEE 519-1992 “Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems”
5. Kolar J.W., Zach F.C.: A Novel Three-Phase Utility Interface Minimizing Line Current Harmonics of High-Power Telecommunications Rectifier Modules. Record of the 16th IEEE International Telecommunications Energy Conference, Vancouver, Canada, Oct. 30 - Nov. 3, pp. 367-374 (1994).