

# ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА С УЛУЧШЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТЬЮ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ

П.О.Чернецов

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет,  
Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

## ABSTRACT

In this article the investigation of a rectifier with Power Factor Correction (PFC) 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.

## ВВЕДЕНИЕ

Установки высокочастотного индукционного нагрева в настоящее время находят всё большее применение в различных областях промышленного производства благодаря появлению высокоэкономичных транзисторных источников питания, работающих в диапазоне до 1 МГц [1]. Разработка и производство транзисторных генераторов в России является очень важной задачей, решение которой позволит ликвидировать возникшее отставание в традиционно передовой для нашей страны отрасли техники, связанной с технологиями индукционного нагрева.

Учитывая опыт ведущих зарубежных фирм в разработке преобразователей на полностью управляемых полупроводниковых ключах, можно сделать вывод о необходимости коренного пересмотра концепции построения преобразователей для индукционного нагрева, сложившейся в отечественной промышленности [2]. Наиболее важные моменты современной концепции построения источников питания для установок индукционного нагрева следующие:

- универсальность (широкий диапазон генерируемых частот, возможность наращивания мощности, глубокое регулирование выходных параметров, программирование алгоритмов управления и регулирования);
- высокий уровень автоматизации (связь с компьютером, протоколирование процессов, диагностика состояния);
- высокие энергетические показатели и улучшенная электромагнитная совместимость с питающей сетью.

Мощные ВЧ источники питания такого класса в России практически не производятся, а в промышленности эксплуатируются устаревшие ламповые генераторы или закупаются дорогостоящие импортные транзисторные преобразователи.

Таким образом, необходимость разработки нового типа транзисторных источников питания большой мощности вполне назрела, причем, одним из важнейших аспектов решения этой задачи является обеспечение высоких показателей электромагнитной совместимости преобразователя с питающей сетью, требования к которым постоянно повышаются.

Функционально преобразователь частоты можно разделить на три основных узла: выпрямитель, инвертор, система управления. Показатели совместимости преобразователя с питающей сетью определяются, главным образом, схемой и принципом управления

выпрямителя, параметрами его входных фильтров. В то же время, важным является вопрос и о совместимости выпрямителя с инвертором, об их согласованном управлении. Используемые в настоящее время выпрямители - нерегулируемые и, тем более, с фазовым регулированием, не удовлетворяют современным стандартам. К примеру, международный стандарт по качеству электроэнергии IEEE 519-1992 "Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems" задаёт максимальные уровни токов высших гармоник (например, для сети с  $I_{SC}/I_L=50\dots100$  - 10% для каждой из гармоник с  $n<11$ , коэффициент гармонических искажений входного тока – 12%). Трёхфазный нерегулируемый мостовой выпрямитель имеет следующие показатели ЭМС с питающей сетью: пятая гармоника входного тока составляет 22,6% от первой, седьмая – 11,1%, коэффициент гармонических искажений - 29,1%.

Доклад посвящен исследованию возможности применения в источниках питания установок индукционного нагрева широко распространенной и отвечающей современным требованиям по электромагнитной совместимости схемы активного выпрямителя типа "Vienna", разработанной в Венском технологическом университете [3]. Рассматривается также вопрос о целесообразном уровне повышения выходного напряжения выпрямителя для оптимального использования высокочастотных транзисторов инвертора по напряжению, а также об оптимальном диапазоне регулирования этого напряжения.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ "VIENNA"

Схема "Vienna" (рис. 1) принципиально представляет собой три однофазных выпрямителя повышающего типа, подключенные параллельно к общей нагрузке.

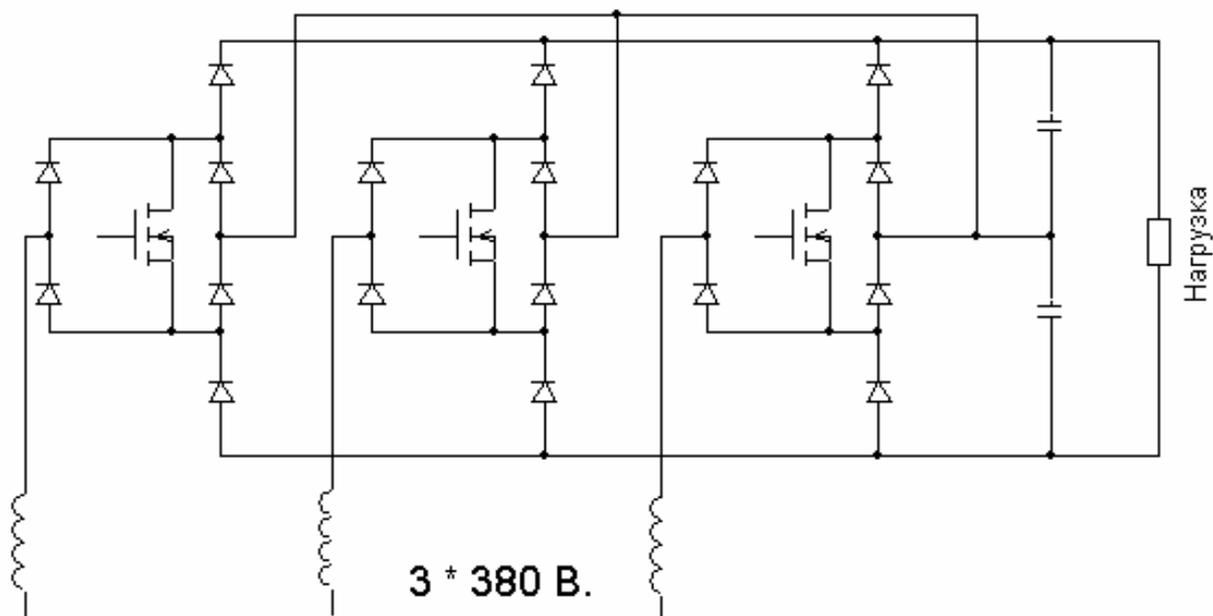


Рис. 1. Схема выпрямителя "Vienna"

Преобразование схемы однофазного выпрямителя для применения в качестве узла трёхфазной схемы представлено на рис. 2. Оно заключается в переносе индуктивности из цепи постоянного тока в цепь переменного тока и добавлении второго развязывающего диода.

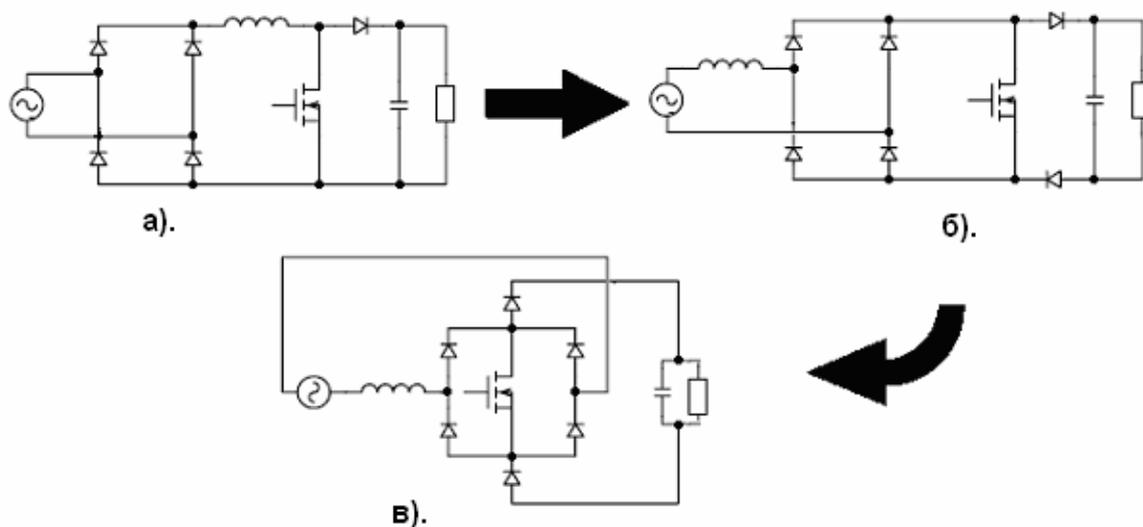


Рис. 2. Преобразование схемы однофазного выпрямителя

Во включенном состоянии транзисторы закорачивают фазные ЭДС сети на входные индуктивности. На этих интервалах энергия, потребляемая от сети, накапливается во входных индуктивностях. При выключении транзисторов энергия из индуктивностей передается в выходной емкостной фильтр, откуда потребляется нагрузкой. Данный принцип соответствует работе повышающего преобразователя.

Схема выпрямителя “Vienna” имеет следующие достоинства:

- индивидуальный контроль тока каждой фазы в отдельности позволяет минимизировать искажения сетевого тока;
- в каждой фазе работает один лишь транзистор на обеих полуволнах входного тока, т.е. схема имеет минимальное количество силовых управляемых ключей и выходных каскадов драйверов.
- нет необходимости формирования “мёртвого времени” в импульсах управления силовыми транзисторами, что упрощает систему управления;
- при аварии нет опасности протекания сквозных токов и закорачивания выходного фильтрующего конденсатора силовыми транзисторами, что повышает надежность;
- при включении силового транзистора к запасующей индуктивности прикладывается не линейное, а фазное напряжение сети, поэтому значение запасующей индуктивности минимально;
- к силовым транзисторам прикладывается половина выходного напряжения, что позволяет применять полупроводниковые ключи с меньшим классом по напряжению.

Все перечисленные выше положительные стороны схемы приобретаются ценой использования большого количества полупроводниковых диодов. В каждой фазе их должно быть по шесть: 4 низкочастотных выпрямительных и 2 высокочастотных блокирующих для варианта исполнения, показанного на рис 1.

Дополнительным аргументом в пользу применения АВ “Vienna” является то, что фирма IXYS разработала и выпускает модули VUM 25-05 и VUM 85-05A, рассчитанные на 10 кВт и 30 кВт соответственно, которые представляют собой однофазные узлы АВ “Vienna” в интегральном исполнении и содержат один силовой транзистор и шесть полупроводниковых диодов. Для сборки трёхфазного АВ “Vienna” необходимо три таких модуля. Эти модули могут быть использованы в источниках питания установок индукционного нагрева средней мощности.

Важным показателем эффективности АВ является диапазон регулирования выходного напряжения, в котором сохраняются как высокие энергетические показатели выпрямителя, так и высокие показатели совместимости с питающей сетью. Исследование регулировочной характеристики АВ и оценка целесообразного уровня номинального напряжения питания инвертора выполнены на компьютерной модели.

### МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ “VIENNA”

Расчетная схема выпрямителя “Vienna” представлена на рис. 3. На ней V1 – V3 – идеальные источники синусоидального напряжения, моделирующие трехфазную систему ЭДС питающей сети; L1 и R1, L2 и R3, L3 и R5 – сумма пассивных параметров сети и параметров входных запасующих индуктивностей фаз А, В, С соответственно.

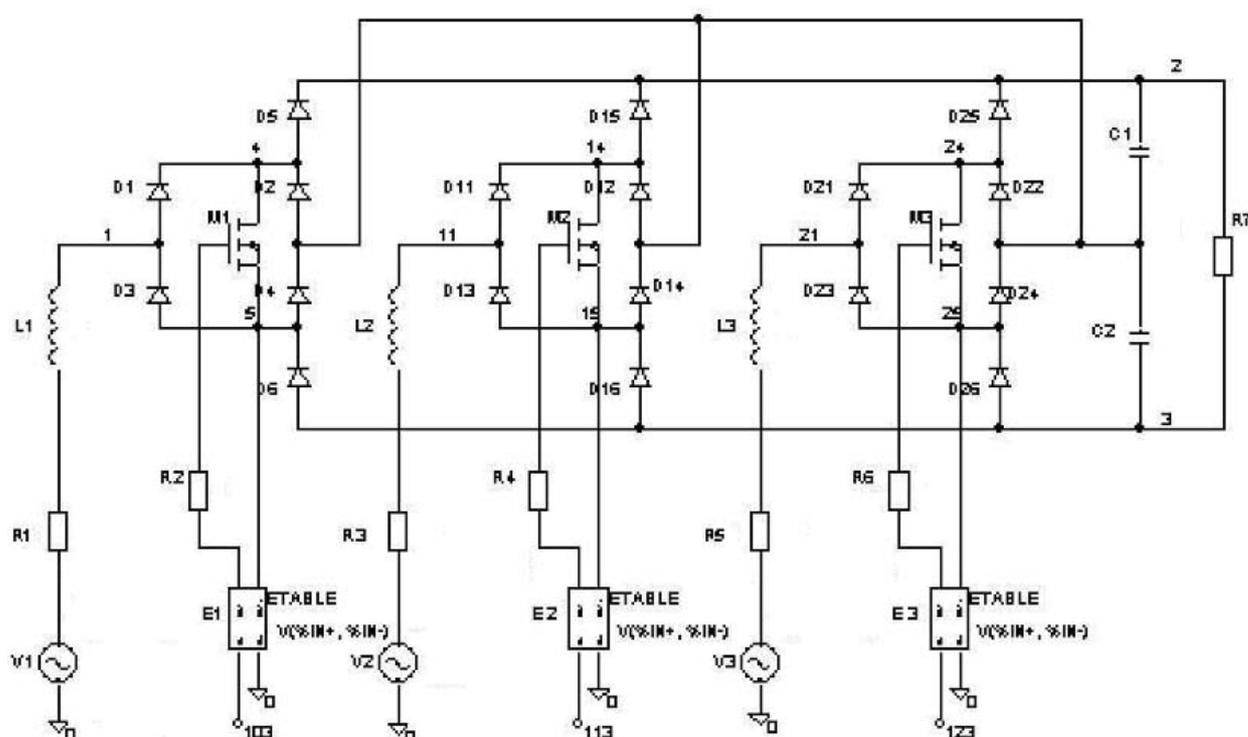


Рис. 3. Расчетная схема выпрямителя “Vienna”

Полупроводниковый узел фазы А представлен силовым транзистором М1 и диодами D1-D6, фаза В – транзистором М2 и диодами D11-D16, фаза С - транзистором М3 и диодами D21-D26. В расчетной схеме использованы полевые транзисторы (MOSFET), однако возможно применение и биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Диоды D1-D4, D11-D14 и D21-D24 – низкочастотные силовые диоды, а D5, D6, D15, D16, D25, D26 – высокочастотные диоды, блокирующие протекание тока от конденсаторов C1 и C2 к транзисторам М1-М3.

Конденсаторы C1 и C2 – ёмкостной фильтр для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения на частоте работы транзисторов. Эти конденсаторы также выполняют функцию делителя напряжения, т.е. образуют виртуальную нулевую точку, чем делают необязательным введение силового нулевого провода. Сопротивление R7 моделирует нагрузку выпрямителя – высокочастотный инвертор напряжения.

Блоки E1 – E3 – модели сильноточных выходных цепей системы управления, преобразующие логические сигналы ТТЛ или МОП в двуполярные сигналы управления силовыми транзисторами +15...-6 В. Резисторы R2, R4, R6 предназначены для формирования тока затвора при переключении транзистора.

Точки 103, 113 и 123 служат входами с логической части системы управления (на расчетной схеме не приведены).

На рис. 4 изображены временные диаграммы входных токов АВ “Vienna” при формировании импульсов управления транзисторов путем сравнения мгновенных значений фазных токов с опорным треугольным сигналом. Для изменения выходного напряжения активного выпрямителя изменяют амплитуду опорного сигнала. Потребляемый АВ сетевой ток при таком алгоритме управления удовлетворяет жестким требованиям стандарта в широком диапазоне регулирования выходного напряжения.

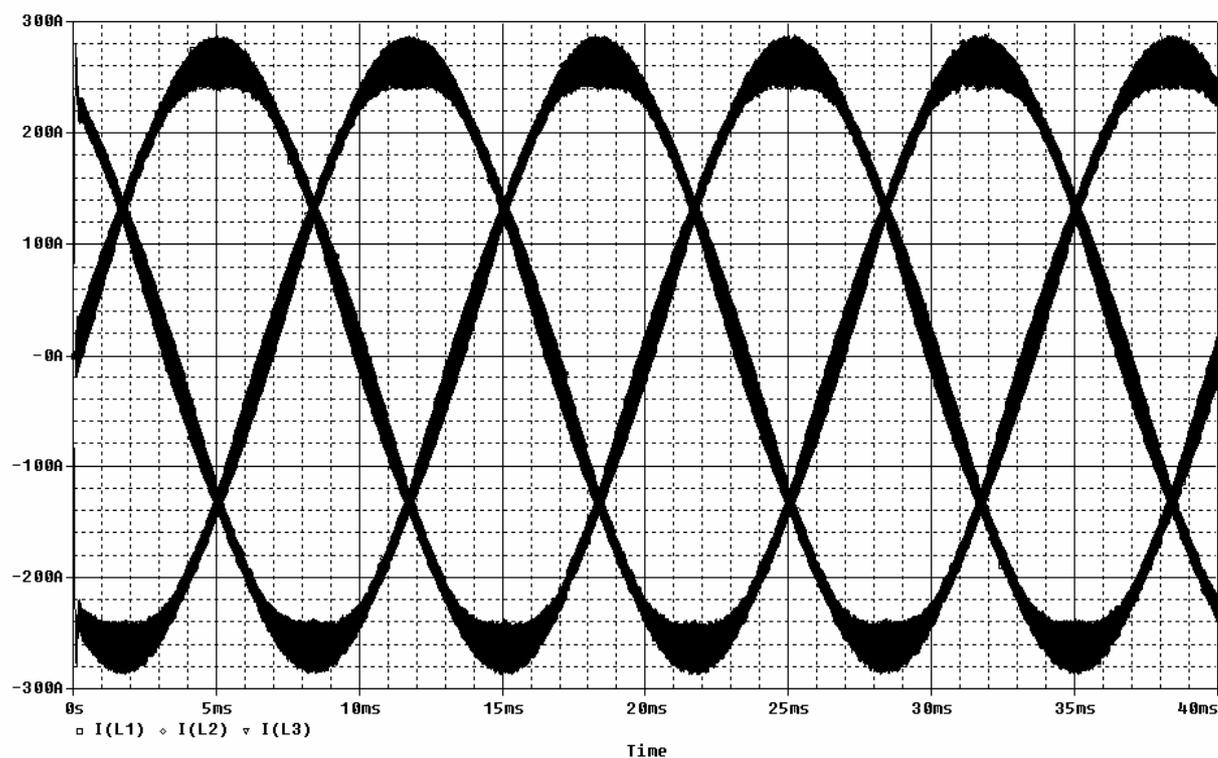


Рис. 4. Временные диаграммы входных токов в АВ

Для оценки допустимого диапазона регулирования выходного напряжения на модели исследованы зависимости показателей энергетической эффективности и электромагнитной совместимости с питающей сетью при вариации выходного напряжения от 600 до 1100 В при постоянной мощности 100 кВт. Повышение напряжения питания инвертора позволит оптимально использовать силовые транзисторы инвертора по напряжению.

На рис. 5. приведено семейство кривых входного тока в фазе А при напряжении в нагрузке 600, 700, 800, 900, 1100 и 1100 В. На рис. 6 изображен увеличенный участок семейства кривых тока в фазе А на максимуме входного напряжения.

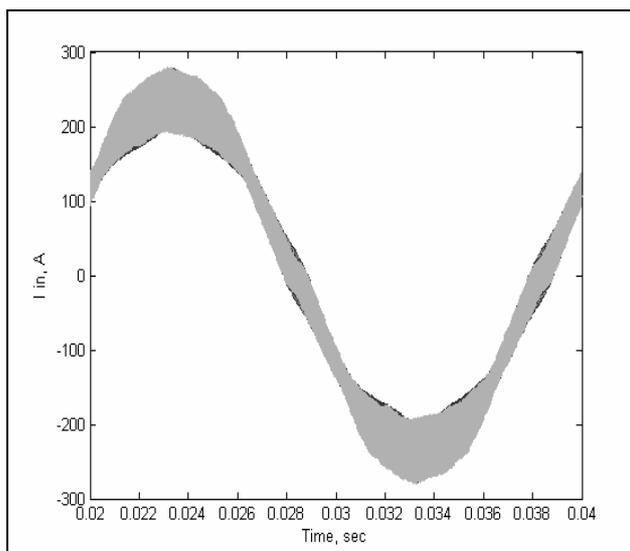


Рис. 5. Кривые тока в фазе А при изменении выходного напряжения от 600 до 1100 В

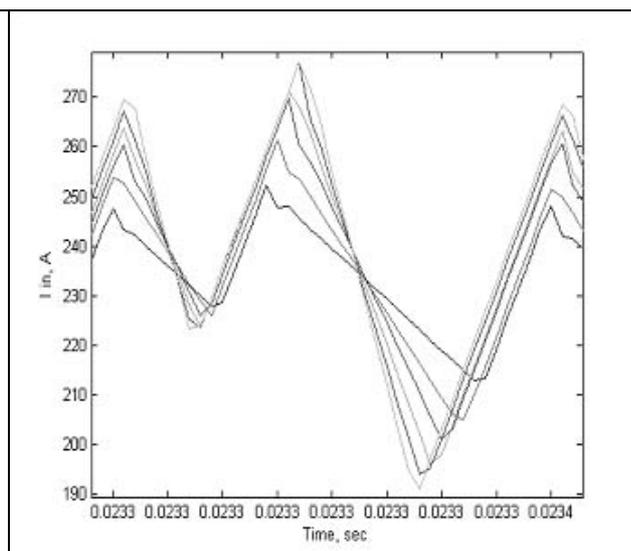


Рис. 6. Кривые тока в фазе А на максимуме входного напряжения

На рис. 7. изображены нормированные относительно первой гармоники значения токов гармоник при различном выходном напряжении. Из них можно видеть, что уровень гармоник, связанных с работой силовых ключей (25 кГц – гармоники с номерами около 500) и кратных им, повышается, но не катастрофично. Таким образом, можно сказать, что существует некоторый диапазон регулирования выходного напряжения для обеспечения дополнительного согласования с низкодобротной индуктивной нагрузкой при работе с инвертором напряжения.

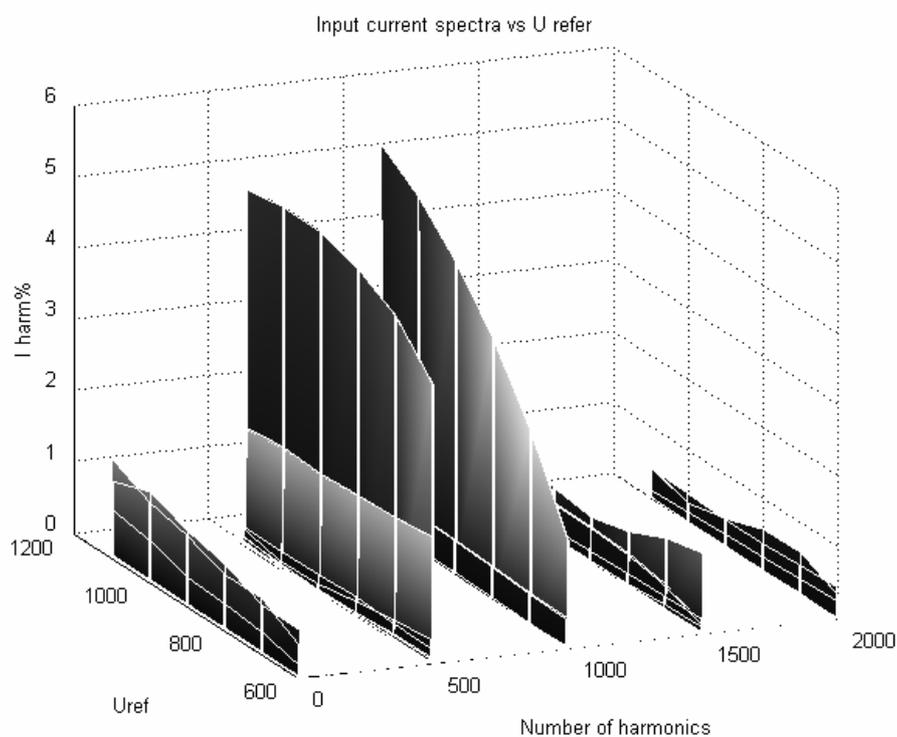


Рис. 7. Нормированные амплитуды гармоник сетевого тока при различном выходном напряжении

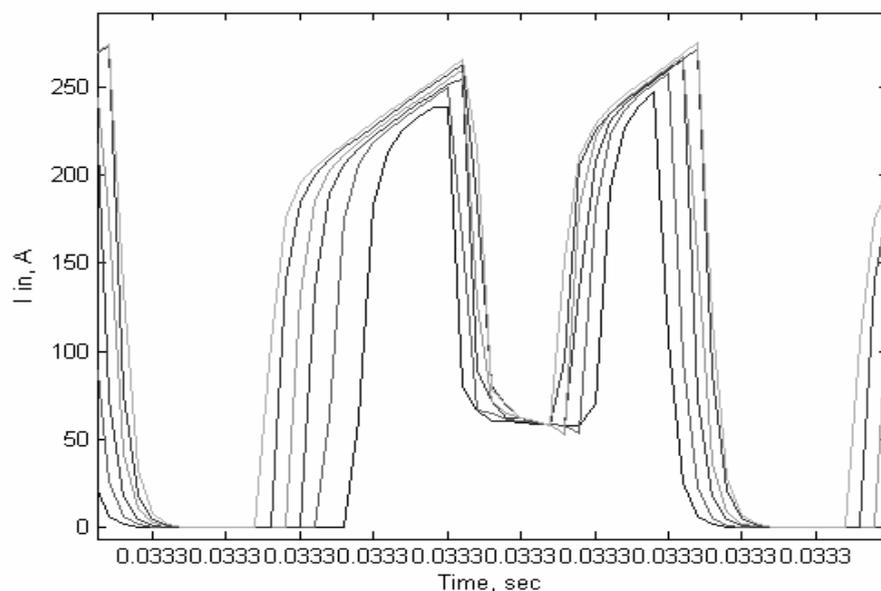


Рис. 8. Временные диаграммы тока в транзисторе фазы А при различном выходном напряжении

На рис. 8. представлены временные диаграммы тока в транзисторе фазы А при изменении выходного напряжения от 600 до 1100 В и неизменной мощности. Из него видно, что амплитуды тока практически остаются неизменными. Несколько увеличивается лишь время проводимости транзистора.

На рис. 9. изображены временные диаграммы напряжения на транзисторе фазы А при различном выходном напряжении. Напряжение на транзисторе во время выключенного состояния равно половине выходного. Также можно наблюдать уменьшение ширины импульса напряжения при увеличении выходного напряжения.

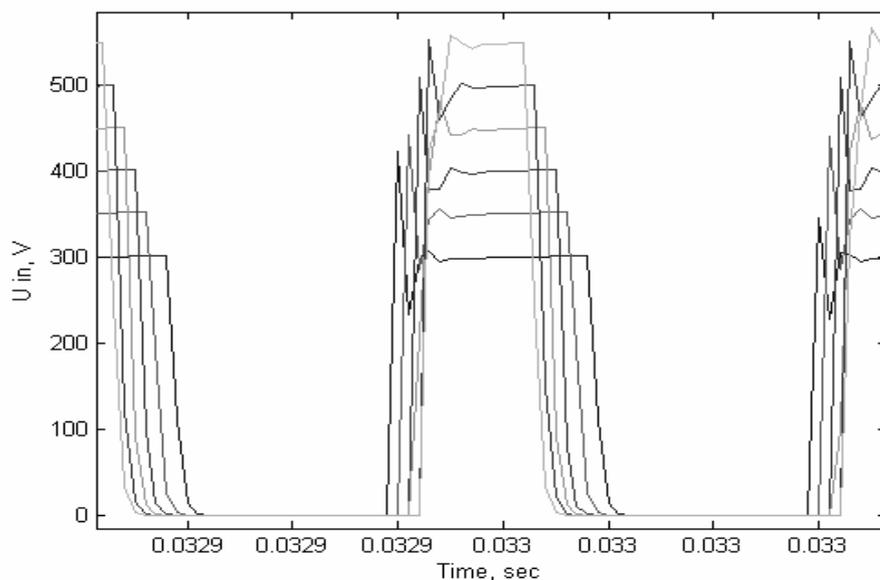


Рис. 9. Временные диаграммы напряжения на транзисторе фазы А при различном выходном напряжении

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Активный выпрямитель типа “Vienna” обеспечивает электромагнитную совместимость источника питания для индукционного нагрева с питающей сетью, которая сохраняется при изменении выходного напряжения в диапазоне от 600 до 1100 В при постоянной мощности 100 кВт. Такое увеличение выходного напряжения выше используемого сейчас порядка 700...750 В. позволяет при неизменной мощности уменьшить ток инвертора и улучшить условия коммутации его транзисторов

Также можно отметить, что существует некоторый диапазон регулирования выходного напряжения для обеспечения дополнительного согласования с низкооборотной индуктивной нагрузкой при работе с инвертором напряжения.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Induction installation for soldering copper buses of power turbo-generator rotors. / S. Dzljev, 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. 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).