

# АВТОПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ В ТРАНЗИСТОРНЫХ ИНВЕРТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Дзлийев С.В., Тихомиров И.С., Патанов Д.А., Чернецов П.О., Бондаренко Д.Н.

(Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет, Россия  
[dzlsv@mail.ru](mailto:dzlsv@mail.ru) )

## Введение

Высокочастотные транзисторные источники питания успешно применяются в составе установок индукционного нагрева. Установки индукционной пайки, закалки, плавки, наплавки, нагрева металла перед пластической деформацией, горячей посадки машиностроительных деталей, стыковой сварки труб и ленты, сварки по отбортованным кромкам, снятия механических напряжений после сварки труб и листовых конструкций, сушки окрашенных металлических поверхностей и другие могут быть укомплектованы транзисторными преобразователями. Их ключевым узлом является транзисторный инвертор напряжения. Оптимальным, с точки зрения коммутационных потерь, режимом работы транзисторного инвертора напряжения является индуктивная расстройка нагрузочного контура, когда частота работы инвертора больше собственной частоты последовательного резонансного контура [1, 2]. Именно в этом режиме обеспечивается «мягкая» коммутация силовых транзисторов. Включение транзистора происходит без потерь при отсутствии на нем напряжения (ток в этот момент течет через обратный диод транзистора). Выключение транзистора происходит при токе, который существенно меньше максимального, что обеспечивает низкие потери выключения.

Одной из основных особенностей индукционной нагрузки является сильная зависимость ее электрических параметров от температуры нагреваемой детали. Активное сопротивление индуктора может изменяться в 2...4 раза, и индуктивное в 1,3...1,6 раза. Это приводит к изменению собственной частоты нагрузочного контура, образованного индуктором и конденсатором, компенсирующим его реактивную мощность.

Для обеспечения оптимального режима работы инвертора на переменную нагрузку система управления должна постоянно согласовывать частоту работы инвертора с частотой нагрузочного контура, обеспечивая минимальную индуктивную расстройку. Для этих целей используют систему управления с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), однако она имеет в своей структуре фильтр низких частот, который уменьшает быстродействие системы и требует увеличения минимального фазового рассогласования,

необходимого для мягкой коммутации транзисторов в динамических режимах, что снижает КПД преобразователя.

Предлагаемый формирователь импульсов с автоподстройкой частоты с адаптивным блоком задания фазового сдвига между выходным током и напряжением инвертора, построенный по принципу самовозбуждения, лишен этих недостатков.

Принцип работы системы управления с автоподстройкой частоты

Функциональная схема транзисторного инвертора напряжения показана на рис. 1. Основными блоками системы управления являются:

1. ФИАПЧ – формирователь импульсов с автоподстройкой частоты, настраивает частоту работы инвертора на частоту нагрузочного контура, обеспечивая индуктивную расстройку с минимальным фазовым сдвигом для мягкой коммутации транзисторов;
2. ДТ – датчик тока нагрузочной диагонали;
3. ДН1, ДН2 – датчики напряжений силовых транзисторов;
4. ДР1...ДР4 – драйверы.

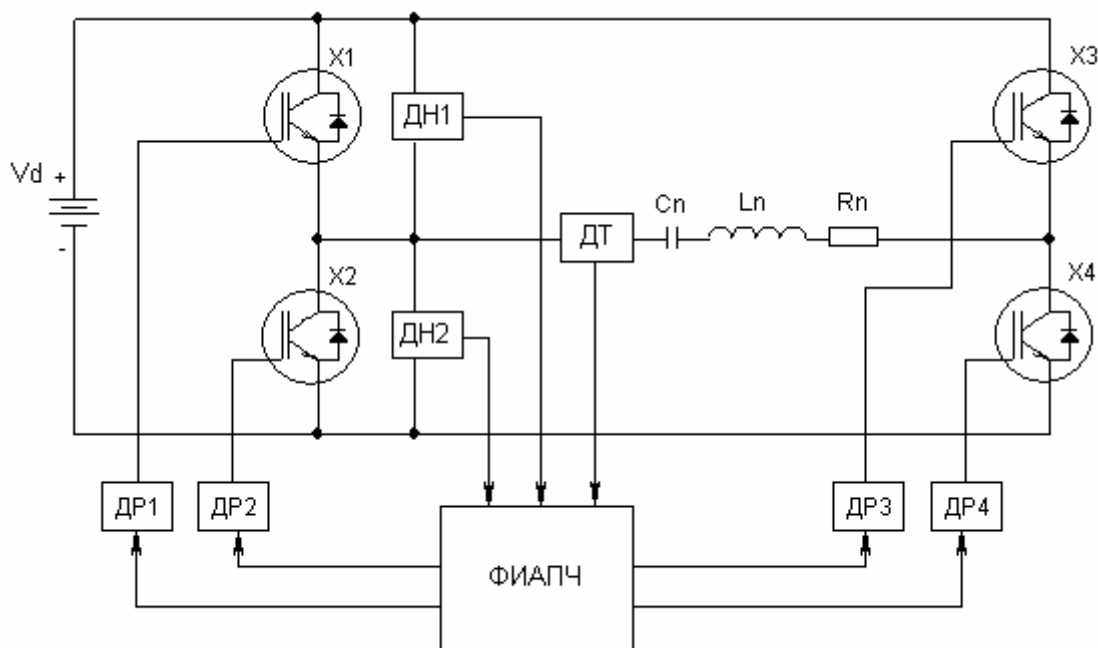


Рис. 1. Функциональная схема транзисторного инвертора напряжения с ФИАПЧ

Отслеживая изменения резонансной частоты нагрузочного контура, связанные с изменением параметров индуктора в ходе технологического процесса ФИАПЧ постоянно подстраивает частоту работы инвертора, обеспечивая оптимальное рассогласование. Частота работы инвертора полностью определяется собственной частотой нагрузочного контура.

## Анализ коммутационных процессов транзисторного инвертора напряжения с ФИАПЧ

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к источникам питания технологических установок, являются надежность и высокие энергетические показатели. Совершенствование транзисторных преобразователей идет за счет разработки алгоритмов управления, оптимизирующих процессы переключения транзисторов с целью снижения коммутационных потерь, которые на высоких частотах являются основными и определяют нагрузочную способность приборов [1].

Целью данного исследования является установить, обеспечивает ли ФИАПЧ оптимальную коммутацию силовых транзисторов при динамических процессах, характерных для установок индукционного нагрева. К таким процессам можно отнести скачки сетевого напряжения, вызванные, например, включением мощных электроустановок или авариями в сетях электроснабжения, изменения частоты колебательного контура и его активного сопротивления, обусловленные температурной зависимостью электрических параметров индукционной нагрузки, межвитковые замыкания в индукторе, кратковременные короткие замыкания индуктора характерные, например, для технологии сварки труб, извлечение детали из индуктора и т.д.

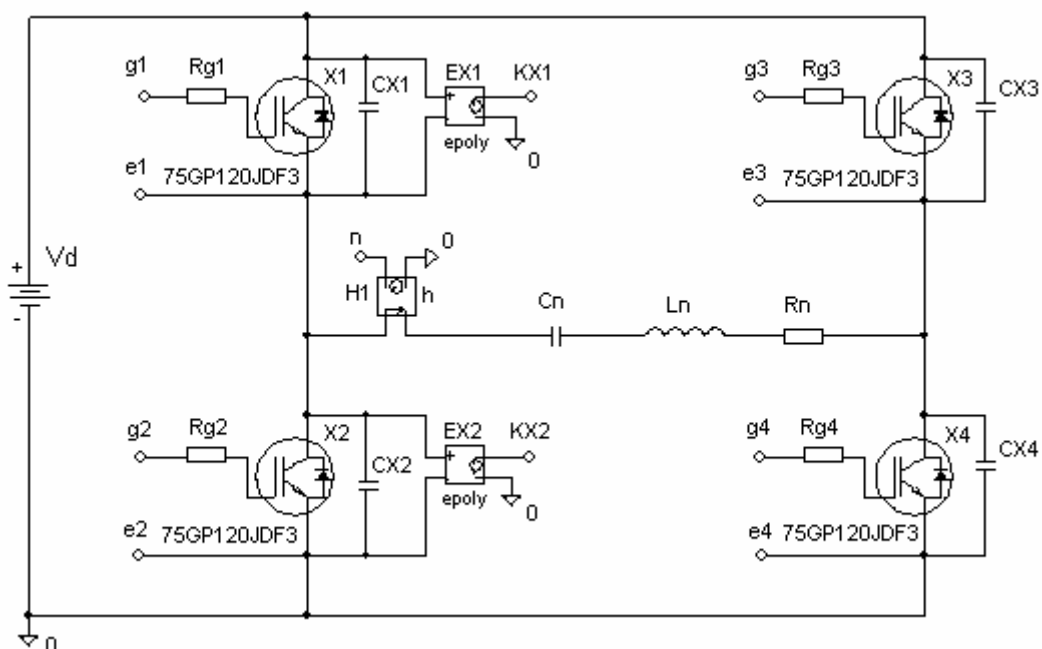


Рис. 2. Модель силовой части транзисторного инвертора напряжения

Исследование коммутационных процессов транзисторного инвертора напряжения с ФИАПЧ проводилось с помощью компьютерного моделирования. Расчетная схема силовой части транзисторного инвертора напряжения приведена на рис. 2. Инвертор питается от идеального источника постоянного напряжения  $V_d$ , который моделирует выпрямитель. Модель

IGBT транзистора APT75GP120JDF3, использованная в расчетной схеме, предоставлена фирмой производителем Advanced Power Technology.

Параметры нагрузочного контура инвертора рассчитаны на мощность  $P_n = 40$  кВт, резонансная частота контура  $f_0 = 250$  кГц, добротность  $Q = 10$ .

Элемент Н1 является датчиком тока нагрузочной диагонали. Элементы EX1 и EX2 контролируют напряжение на силовых ключах X1 и X2. Сигналы с датчиков поступают на систему управления. Небольшие емкости CX1...CX4 служат для снижения потерь выключения транзисторов. Они задерживают рост напряжения на выключающихся транзисторах, и коммутация проходит при низком напряжении.

На рис. 3. приведены токи силовых транзисторов и мощность потерь в них для случая быстрого изменения частоты колебательного контура из-за увеличения емкости компенсирующего конденсатора  $C_n$ , которое может быть обусловлено, например, необходимостью вернуть частоту работы инвертора в разрешенный радиочастотный диапазон.

Частота колебательного контура изменилась в момент времени  $t_1$ . Система управления мгновенно отреагировала на это изменение и настроила частоту работы инвертора на частоту нагрузочного контура, обеспечив оптимальное рассогласование.

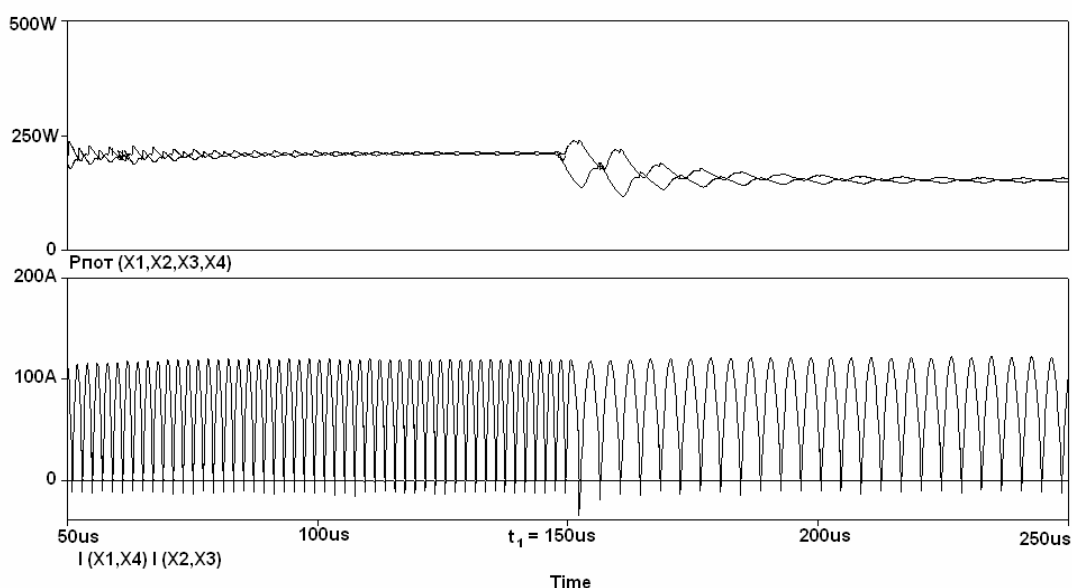


Рис.3. Временные диаграммы токов и мощности потерь силовых транзисторов при скачкообразном увеличении емкости компенсирующего конденсатора в 4 раза

На рис. 3. видно, что мощность потерь  $P_{пот}$  в транзисторах начинает уменьшаться с момента времени  $t_1$ . Это обусловлено двумя факторами. Во – первых, при уменьшении частоты работы инвертора соответственно уменьшилось число коммутаций транзисторов в единицу времени. Во – вторых, ФИАПЧ уменьшил угол рассогласования, что привело к отключению

транзисторов при меньшем токе и тем самым к снижению потерь выключения.

На рис. 4. приведены временные диаграммы токов силовых транзисторов и мощности потерь в них для случая изменения напряжения питания инвертора, которое может быть вызвано либо колебаниями сетевого напряжения, либо регулированием мощности источника питания.

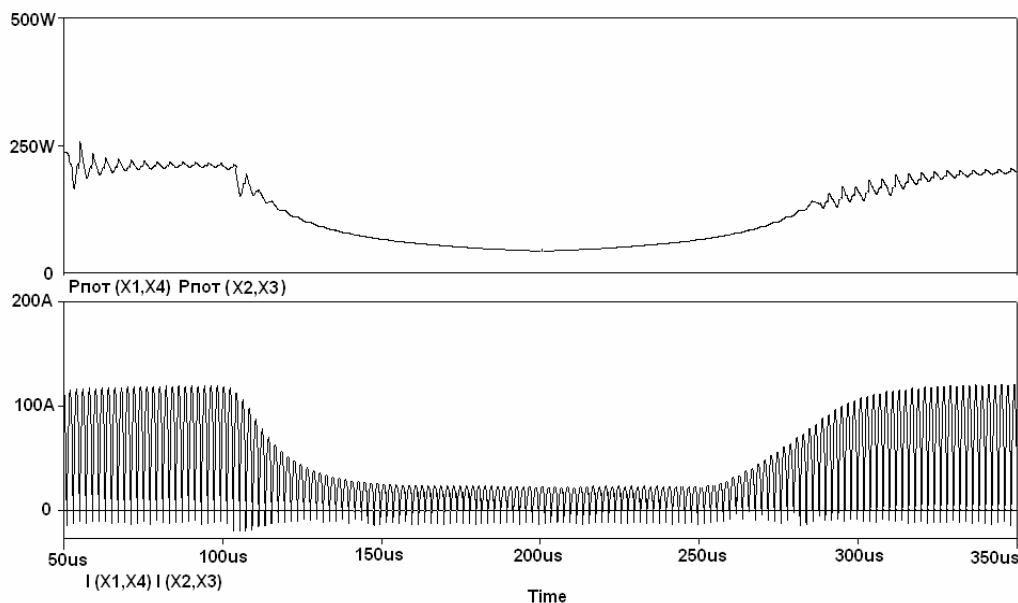


Рис. 4. Временные диаграммы токов силовых транзисторов и мощности потерь в них при кратковременном снижении напряжения питания с 500В до 100В

Снижение средних потерь мощности в транзисторах обусловлено общим снижением тока и напряжения транзисторов, а также поддержанием системой управления оптимального угла рассогласования.

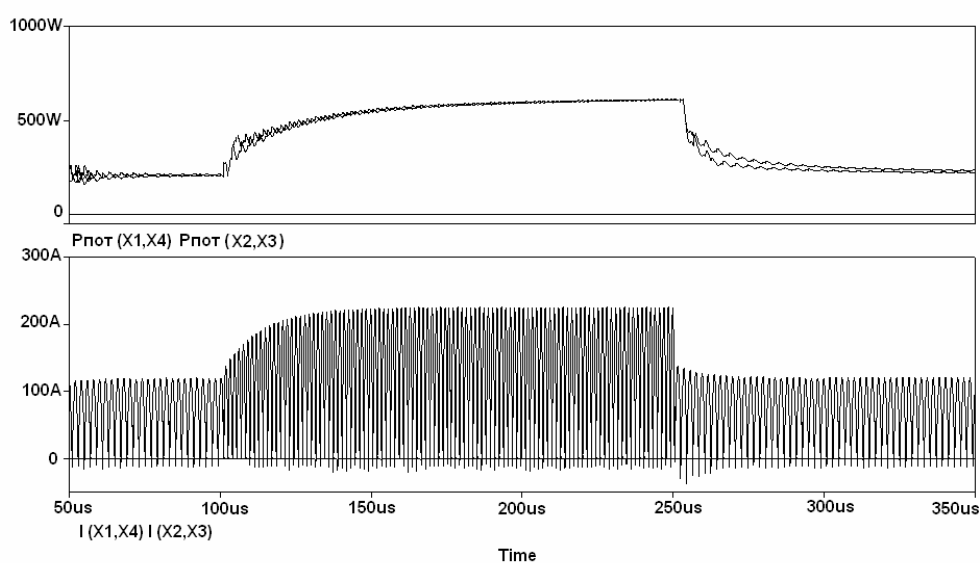


Рис. 5. Временные диаграммы токов силовых транзисторов и мощности потерь в них при кратковременном межвитковом замыкании в индукторе

На рис. 5. приведены результаты моделирования процесса в инверторе при кратковременном межвитковом замыкании в индукторе, при котором изменяется собственная частота и добротность нагрузочного контура.

Увеличение мощности потерь в транзисторах обусловлено, главным образом, потерями прямой проводимости из-за увеличения амплитуды тока, в то время как, коммутационные потери, благодаря ФИАПЧ, остаются незначительными. С завершением аварийной ситуации инвертор плавно переходит в нормальный режим работы.

## Заключение

Предложенная система управления с автоматической подстройкой частоты поддерживает оптимальную коммутацию силовых транзисторов и обеспечивает устойчивую работу транзисторного инвертора напряжения в различных динамических режимах, характерных для источников питания установок индукционного нагрева. Данный алгоритм управления позволит разрабатывать надежные, высокоэффективные, универсальные источники питания для различных индукционных технологий.

## Список литературы

- 1) Коммутационные процессы в транзисторных инверторах для индукционного нагрева/ Бондаренко Д.Н., Дзлиев С.В., Патанов Д.А.// Изв. ГЭТУ. - 1996. - Вып. 497. - С.98-110.
- 2) Общие проблемы снижения коммутационных потерь в инверторах напряжения / Д.А. Патанов // Журнал «Схемотехника» №7, 2001г.