

Тиристорные инверторы с обратными диодами

для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов

В данной статье произведен сравнительный анализ эффективности использования силовых элементов (тириستоров, диодов, силовых конденсаторов и катушек индуктивности) автономных резонансных инверторов с обратными диодами, разработанных для тиристорных преобразователей частоты в Уфимской школе индукционного нагрева. Школа была создана под научным руководством доц. С. М. Кацнельсона, Г. И. Сабанеевой, С. В. Шапиро и Л. Э. Рогинской. Проведенный с единых позиций сравнительный анализ стал возможным относительно недавно, благодаря применению новых PSpice-моделей элементов и расширению возможностей программы схемотехнического моделирования MicroCAP 9, где эти модели используются. Приводятся критерии эффективного использования силовых элементов для рассматриваемых схем тиристорных автономных инверторов.

Зульфия Валиуллина

valiullina_ela@mail.ru

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ), как правило, используют в схемах электроприводов. Это, действительно, их традиционное применение, что нашло широкое отражение в технической литературе и учебных курсах для студентов учебных заведений. Однако для техники электропривода, по известным причинам, в основном используются тиристорные автономные инверторы с симметричным трехфазным выходом. В установках индукционного нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) применяют однофазные схемы автономных тиристорных инверторов, которые обладают рядом особенностей.

Таким образом, тиристорные преобразователи частоты для электропривода стали основой при проектировании ТПЧ для техники индукционного нагрева ТВЧ. А название «независимый инвертор» [1] можно считать синонимом современного «автономного инвертора».

В технике индукционного нагрева тиристорным преобразователем частоты (ТПЧ) называется силовое устройство, подключенное к сети промышлен-

ной частоты, которое состоит из выпрямителя и автономного инвертора (АИ), преобразующего постоянный ток в однофазный ток высокой частоты (ТВЧ). Это, как правило, преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока — выпрямителем.

Тенденции совершенствования схем автономных инверторов

Классификацию тиристорных автономных инверторов, используемых в установках индукционного нагрева металлов, осуществляют по различным признакам, но основные из них естественны и просты — это, в первую очередь, схемные признаки: мостовая, полумостовая или четвертьмостовая схемы [3, 4].

Основные тенденции в развитии технических решений (ТР) в области проектирования установок индукционного нагрева металлов, а также современный уровень проектирования ТПЧ целесообразно определять, используя патентную информацию. Строгая формулировка предмета изобретения в патенте — для юридической защиты прав заявителя — позволяет определить обобщенные цели, достигаемые при реализации схемного решения тиристорных инверторов.

Обобщенные цели, наиболее часто встречающиеся среди технических усовершенствований тиристорных автономных инверторов для электротермической обработки металлов, нами определялись по международному классификатору изобретений (МКИ). Анализировались описания авторских свидетельств по классу H02 M 7/72, 5/42 и других, смежных с ними, за период с 1985-го по 1990 г., когда рас-

Таблица. Обобщенные цели технических решений АИ

Пункт	Достижимые цели ТР	Колич. ТР
1	Повышение надежности	240
2	Улучшение энергетических характеристик	168
3	Упрощение	165
4	Уменьшение массо-габаритных показателей	30
..
24	Гальваническая развязка	12
25	Расширение функциональных возможностей	6

считываемая отрасль техники получила наибольшее развитие.

Выявленные обобщенные цели и количество предложенных в соответствии с ними АИ показаны в таблице.

Приведенные данные показывают, что основное внимание при совершенствовании технических характеристик уделялось повышению надежности. Если учесть технические решения, которые, в итоге, также повышают надежность, становится очевидным, что эта цель была доминирующей. Проанализировав данную выборку, можно убедиться в том, что на «втором месте» — улучшение энергетических характеристик и повышение КПД. Эта цель в силовой электронике достигается путем уменьшения массо-габаритных показателей (пункт 4).

Улучшение энергетических характеристик АИ это, с другой стороны, путь к эффективному использованию элементов силовой схемы.

Наконец, остальные пункты таблицы, малочисленные по количеству технических решений, характерны целями, специфичными для конкретного использования схемы, например, для вакуумной индукционной печи существенно требование гальванической развязки входной и выходной цепей ТПЧ.

Особенно следует остановиться на пункте 25 «Расширение функциональных возможностей». Практическое отсутствие в выборке технических решений с такой задачей служит критерием того, что анализу подвергались решения, относящиеся к конкретной технической проблеме. С другой стороны, это показывает, что универсальность применения ТПЧ в установках индукционного нагрева металлов не всегда оправдана, напротив, современная тенденция заключается в создании специализированных силовых установок с более высокими технико-экономическими показателями. Сказанное не исключает применение типовых схем автономных инверторов.

Обобщенные цели технических решений, выявленные для рассмотренного класса МПК, обоснованы «Методикой оценки качества высокочастотного и ультразвукового оборудования», разработанной ВНИИ ТВЧ.

Технический уровень ТПЧ целесообразно определять по комплексному показателю на основании экспертных оценок. Это можно объяснить известными трудностями, обуслов-

ленными необходимостью учета противоречивых факторов. Задача усложняется, если принять во внимание неоднозначную оценку преимуществ и недостатков при использовании известных схем для проектирования инверторно-индукторных электротехнических комплексов.

В результате нами разработана библиотека технических приемов для совершенствования схемных решений и технических характеристик тиристорных автономных инверторов, созданная на основе анализа большого количества патентных материалов, и сформулированы некоторые эвристические приемы, эффективные для достижения указанных целей.

Инверторы, формирующие на выходе несинусоидальную форму тока с высшими гармониками, на одну из которых настроена резонансная индукционная нагрузка, называются полирезонансными.

Возможность существования комбинированных схем со смешанными признаками значительно усложняет их классификацию, но способствует выявлению новых свойств автономных инверторов, некоторые из которых оказываются полезными и находят применение при проектировании силовых установок для индукционного нагрева металлов. Такие схемы обладают новизной и полезностью и признаются изобретениями.

Техническое решение мостовой схемы АИ с обратными диодами [1] явилось прототипом десятков изобретений ТПЧ для индукционного нагрева металлов [2].

На рис. 1 в окне демо-версии MicroCAP 9 приведены три классические схемы тиристорных автономных инверторов — преобразователи постоянного тока в однофазный высокочастотный ток. Это четвертьмостовой инвертор (иначе однотактная, несимметричная схема), полумостовой инвертор и мостовой инвертор с диодами обратного тока.

Диоды обратного тока, включенные встречно-параллельно тиристорам, традиционно используются в схемах уфимских преобразователей. Они уменьшают «раскачку» напряжения и стабилизируют уровень действующих токов и напряжений при изменении сопротивления нагрузки автономного инвертора в широком диапазоне, характерном для инверторно-индукционных силовых установок.

Три схемы автономных инверторов присоединены к общему для них источнику питания величиной 520 В, равному максимальному выпрямленному напряжению мостовой трехфазной схемы выпрямителя, подключенного к стандартной питающей сети $3 \times 380 \text{ В} - 50 \text{ Гц}$, как это имеет место в большинстве случаев при подключении мощных потребителей.

На входе этих схем включены дроссели постоянного тока с величиной индуктивности в 4 мГн. Дроссели такой величины необходимы для формирования внешней характеристики АИ как источника тока и для ограничения токов ВЧ, передаваемых в источник питания ТПЧ. Допускаем, что в схемах рис. 1 использованы одинаковые тиристоры, диоды и силовые элементы (коммутирующие конденсаторы и катушки индуктивности).

Установим равные параметры коммутирующих элементов (30 мкФ и 80 мкГн) и одинаковым последовательное эквивалентное сопротивление активной нагрузки 0,4 Ом в каждой схеме автономного инвертора. Наконец, установим одинаковую частоту включения тиристоров.

Произведем анализ электромагнитных процессов этих схем в программе схемотехнического моделирования MicroCAP 9. Удобство применения такого метода анализа заключается в наглядности результатов, которые получают в единых координатах для времени, напряжения, тока и мощности.

На рис. 2 приведены полученные нами временные графики установившегося значения выходного тока для этих схем.

Кривая выходного тока четвертьмостовой схемы инвертора имеет максимальную амплитуду. Кривая выходного тока мостовой схемы инвертора минимальна по амплитуде. Кривая тока нагрузки полумостовой схемы инвертора располагается между ними. Постоянная составляющая выходного тока для всех схем равна нулю, так как нагрузка включена последовательно с конденсатором.

Мы не будем обсуждать существенную разницу амплитуды полученных кривых, но отметим, что она полностью зависит от величины эквивалентного напряжения в электрическом контуре с тиристором для момента включения.

Установившуюся амплитуду тока после окончания переходного процесса, необходимую для выбора параметров полупроводниковых элементов, рассчитывается аналитиче-

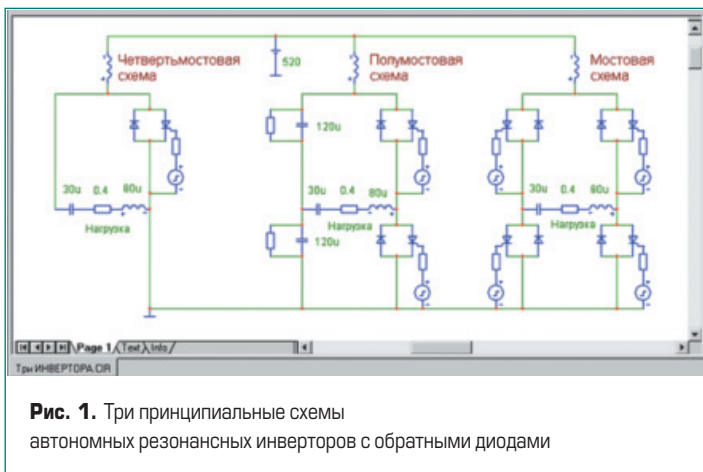


Рис. 1. Три принципиальные схемы автономных резонансных инверторов с обратными диодами

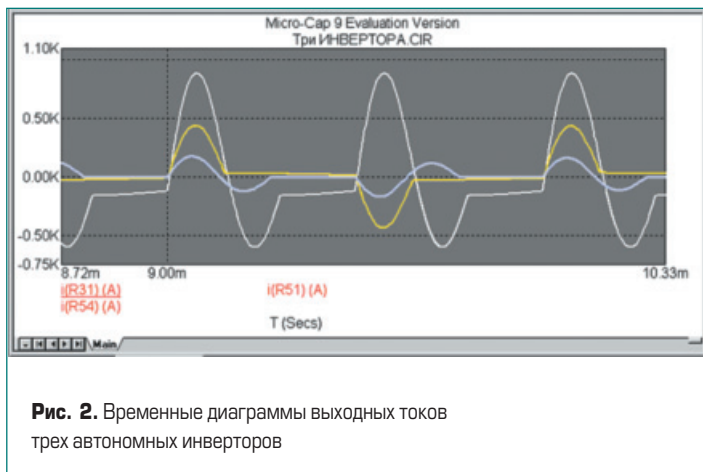


Рис. 2. Временные диаграммы выходных токов трех автономных инверторов

ски, однако моменты коммутации токов тиристором и диодом, необходимые для анализа переходных процессов, находятся при решении трансцендентных уравнений, которые практически не используются в инженерной практике.

Критерии эффективности использования тиристор

Критерием эффективности использования силовых элементов в различных схемах автономных инверторов ранее рассматривалась суммарная установленная мощность однотипных элементов в сравнении с выходной мощностью схемы. Этот критерий достаточно полно характеризует силовые конденсаторы и индуктивные элементы (по величине кВАр). Однако силовые полупроводниковые элементы — тиристоры, диоды, IGBT-модули — не полностью зависят от него.

Для тиристор, в свое время, использовались такие критерии, как $n(U_m \times J_m)$, где n — количество тиристор, U_m и J_m — максимальная величина напряжения и тока тиристор. Предлагались различные комбинации произведений основных параметров с эмпирическими коэффициентами — $(k_1 U_m)$, $(k_2 J_m)$, $(k_3 du/dt)$, $(k_4 di/dt)$, $(k_5 t_{восст})$ и т. д.

В настоящее время целесообразно использовать единую оценку для всех полупроводниковых элементов принципиальных силовых схем, в качестве которой необходимо принять стоимость однотипных комплектующих элементов для изделий с одинаковыми обобщенными параметрами.

Обобщенным параметром ТПЧ для индукционного нагрева может являться произведение номинальной выходной мощности и рабочей частоты потому, что силовые инверторы $320 \text{ кВт} \times 1000 \text{ Гц}$, $80 \text{ кВт} \times 4 \text{ кГц}$, $20 \text{ кВт} \times 16 \text{ кГц}$ имеют одинаковую стоимость комплектующих элементов. Поясним, что для четвертьмостовой схемы, согласно рис. 1, конструктивно требуется 4 тиристора, соединенных последовательно, в полумостовой схеме требуется 2×2 тиристора, минимальное количество тиристор для мостовой схемы равно 4.

Цена электротехнического изделия в самом общем случае определяется стоимостью комплектующих элементов, издержками производства и стоимостью интеллектуальной составляющей, в составе которой можно рассматривать отличительные свойства изделия, например, расширенный диапазон регулирования выходной частоты. Такой подход соответствует современным требованиям.

Отметим, что при схемотехническом моделировании в MicroCAP, кроме мощности (POWER) силового диода, можно фиксировать и другие параметры, например, его стоимость, как показано на рис. 3.

На рис. 3 представлена панель параметров диода (слева) в рабочем окне программы схемотехнического моделирования MicroCAP 9. На панели приведена стоимость (COST) примененного типа диода в списке элементов, показывающих общую стоимость электрической схемы (справа внизу панели).

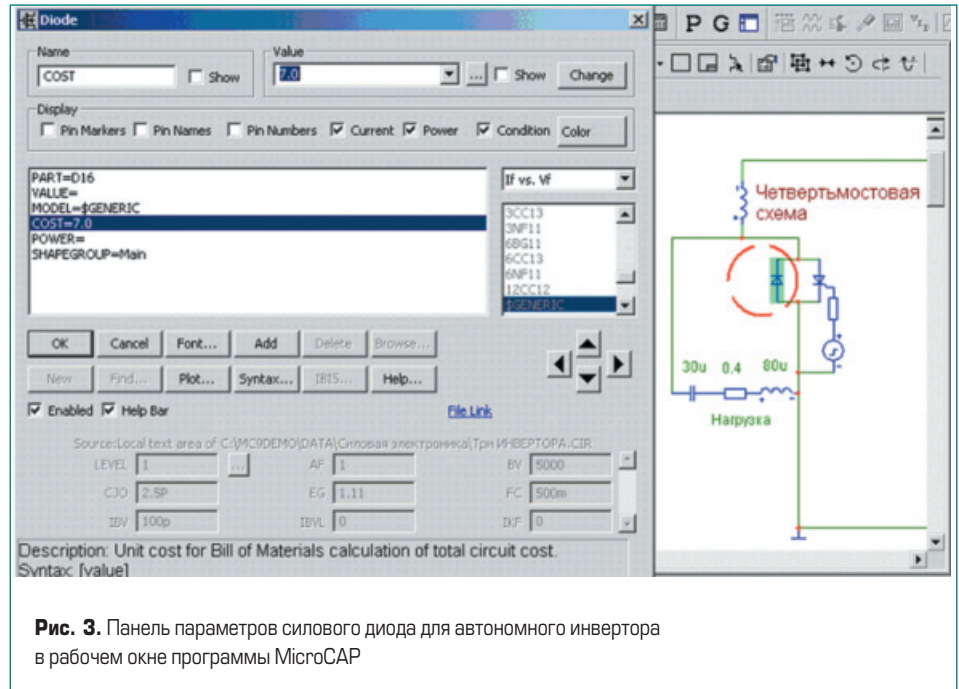


Рис. 3. Панель параметров силового диода для автономного инвертора в рабочем окне программы MicroCAP

Первый и второй уровень представления модели элемента (LEVEL) для силового полупроводникового диода позволяет упростить расчеты при исследовании переходных процессов, частотного анализа, разложения Фурье и т. д. в процедурах схемотехнического моделирования исследуемой схемы. В то же время варьирование параметров элемента, согласно процедуре stepping для перечисленных видов анализа, возможно только для таких параметров, которые, оказывается, существенно не влияют на стоимость элемента.

В меню Transient analysis устанавливается рабочая температура схемы, уточняющая результаты расчета переходных процессов при моделировании диода элементом высшего третьего уровня.

Заметим, что вес и габариты статических преобразователей, как многих других изделий силовой электроники, при повышении рабочей частоты в настоящее время имеют существенную тенденцию к уменьшению. Снижает эту разницу поверхностный эффект, при котором проводники имеют уменьшенное эффективное сечение, обусловленное глубиной проникновения тока, и возрастание потерь на вихревые токи в конструкционных материалах.

Условие равной мощности автономных инверторов

Из изображенных на рис. 1 установках для индукционного нагрева металлов обычно применяются первая и третья схемы. Полумостовая схема автономного инвертора не имеет каких-либо существенных преимуществ, поэтому в данной работе произведем сравнительный анализ четвертьмостовой и мостовой схем, нашедших самое широкое применение в отечественных и зарубежных разработках.

Следует отметить, что применение новой схемы инвертора или ее модификации для практической реализации требует от разработчиков большого опыта и изучения особенностей. Основная задача — выявление режимов работы, которые характерны эффективной нагрузкой полупроводниковых элементов автономного инвертора по току, напряжению, частоте, а для конденсаторов, катушек индуктивности, трансформаторов — нагрузкой по установленной реактивной мощности.

На рис. 4 в рабочем окне программы MicroCAP справа показаны четвертьмостовая и мостовая схемы автономных инверторов. Параметры коммутирующих элементов

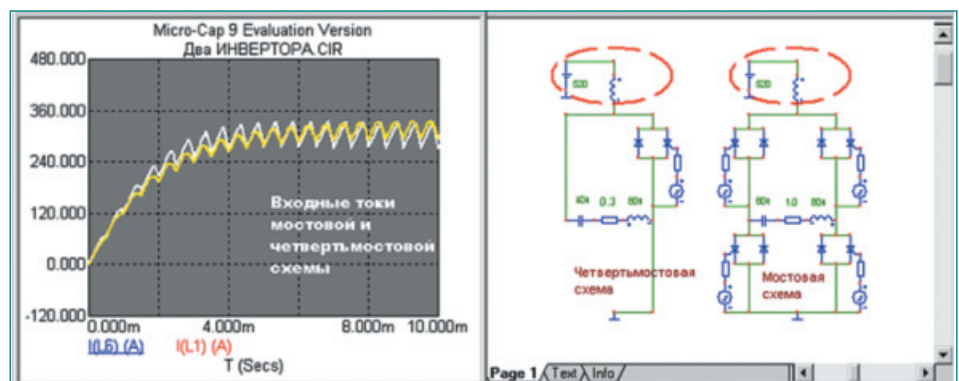


Рис. 4. Включение дросселей постоянного тока (справа) и временные диаграммы переходного процесса и пульсаций тока в них (слева)

автономных инверторов изменены в сравнении с рис. 1 таким образом, чтобы обеспечить одинаковую входную мощность и рабочую частоту.

Слева на рис. 4 показаны две кривые переходного процесса входных токов автономных инверторов с одинаковыми источниками питания и величиной входных дросселей.

Важнейшими константами схем инверторов являются волновое сопротивление $\rho = \sqrt{L_k/C_k}$ и собственная угловая частота $\omega = 2\pi f = 1/\sqrt{L_k C_k}$ колебательного контура.

Волновое сопротивление определяет критическую величину эквивалентного сопротивления нагрузки в цепи коммутации тиристор инвертора. Потенциально первая схема должна допускать большую величину максимального эквивалентного сопротивления нагрузки, чем вторая. Это качественный вывод.

Здесь уместно сказать, что точный анализ электромагнитных процессов в автономных инверторах может потребовать применения специфических методов расчета. Результаты такого анализа менее информативны, чем применение методов схемотехнического моделирования, с помощью которого несложно определить требуемую величину сопротивления нагрузки.

На рис. 4 показаны входные токи двух автономных инверторов, практически совпадающие по всем параметрам (время переходного процесса, амплитуда и частота пульсаций, максимальное значение).

Особо отметим различную величину эквивалентного сопротивления нагрузки — 0,3 Ом для четвертьмостовой инвертора и 1 Ом для мостовой схемы, которые соответствуют равной потребляемой мощности при установленных параметрах коммутирующих элементов и определенной частоте включения тиристоров.

Установившаяся величина входной мощности после окончания переходного процесса в каждой из схем (согласно рис. 4) составляет:

$$U_d \times I_d = 520 \text{ В} \times 300 \text{ А} = 156 \text{ кВт}$$

Условие равенства входных токов автономных инверторов (а значит, и мощности) является основанием для сравнения других параметров этих схем. Наличие дросселя в цепи постоянного тока автономного инвертора превращает источник его питания из источника напряжения в источник тока. Поэтому эти инверторы можно рассматривать в качестве переключателя тока резонансного типа.

Равную мощность этих схем АИ можно получить и при одинаковой величине эквивалентного сопротивления нагрузки. Мы же рассматриваем параметры коммутирующих элементов, соответствующие базовому режиму [5].

Сравнение параметров автономных инверторов равной мощности

Важнейшим параметром является выходной ток инвертора. Он определяет загрузку полупроводниковых элементов, наиболее критичных к перенапряжениям и перегрузкам по току.

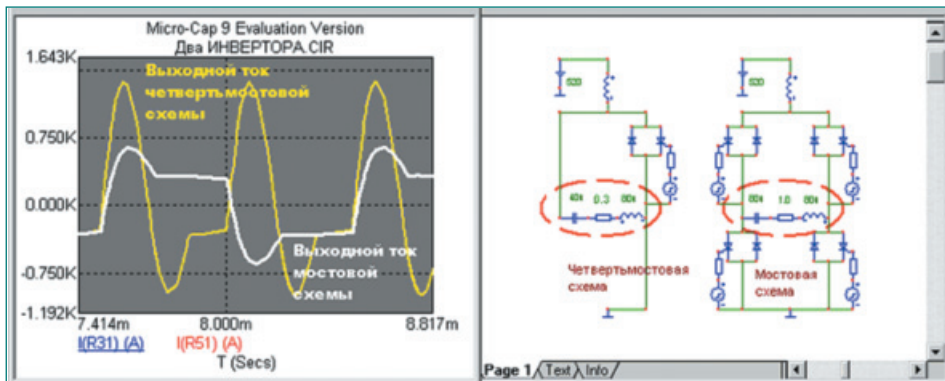


Рис. 5. Коммутирующие элементы и нагрузка автономных инверторов (выделены справа) и протекающий по ним выходной ток (слева)

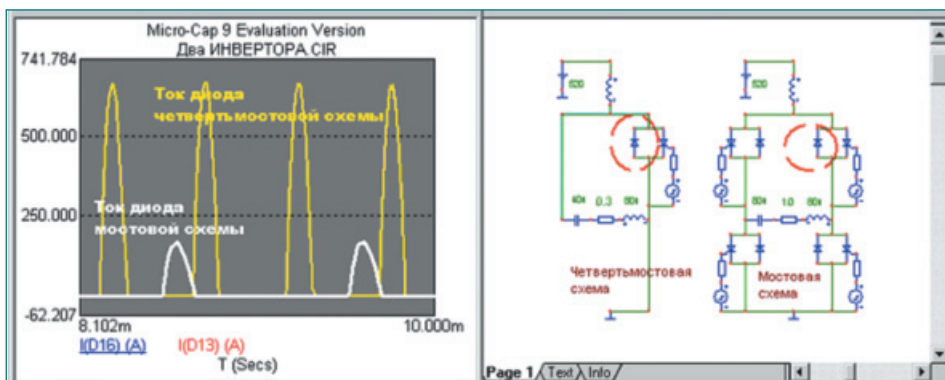


Рис. 6. Обратные диоды (выделены справа) и токи диодов (изображены слева) автономных резонансных инверторов

На рис. 5 представлена характерная форма кривых выходного тока для каждой из схем в режиме номинальной мощности. Эти кривые показывают, что в момент паузы (непроводящего состояния вентилей автономного инвертора) в нагрузке протекает постоянная составляющая входного тока инвертора. При этом во второй схеме она реверсируется в нагрузку, увеличивая амплитуду первой гармоники выходного тока, а в первой — четвертьмостовой схеме — постоянная составляющая входного тока не меняет своего направления, но при этом можно наблюдать эффект удвоения выходной частоты автономного инвертора. Загрузка тиристоров по току в первой схеме существенно выше.

Резонансный режим работы автономных инверторов характеризуется почти синусоидальным изменением тока в момент включения тиристора, поэтому скорость нарастания тока в тиристоре di/dt далека от критической величины, допускаемой высокочастотными тиристорами.

Начальная скорость нарастания тока тиристор в момент их включения определяется выражением

$$di/dt (t=0) = 2U_d\omega_0/\rho.$$

На рис. 6 показаны графики токов обратных диодов исследуемых схем автономных инверторов при равной входной мощности. Длительность протекания тока диода определяет время восстановления управляющих свойств тиристоров. По этому параметру рас-

сматриваемые схемы потенциально равноценны [6].

Другой параметр — величина среднего тока, протекающего через диоды, — существенно выше у четвертьмостовой схемы. Однако по этому параметру диоды необходимо выбирать исходя из максимального значения при минимальном сопротивлении нагрузки. Это режим короткого замыкания нагрузки (КЗ), характерный для применения автономного инвертора в преобразователях частоты для индукционных установок ТВЧ. В этом отношении рассматриваемые схемы также равноценны.

Характеристики тиристорных преобразователей частоты

На рис. 7 показаны графики напряжений на коммутирующих конденсаторах автономного инвертора. Графики имеют различную форму, но у них много общего. В частности, в интервале паузы напряжение на конденсаторах возрастает по линейному закону, достигая максимального значения к моменту включения тиристора.

Линейное возрастание напряжения объясняется протеканием постоянного тока входного дросселя по конденсатору на этом этапе работы автономного инвертора. Максимальная величина этого напряжения определяет уровень напряжения на других элементах автономного инвертора — тиристорах и катушках индуктивности. Превышение этой величины над значением напряжения питания ин-

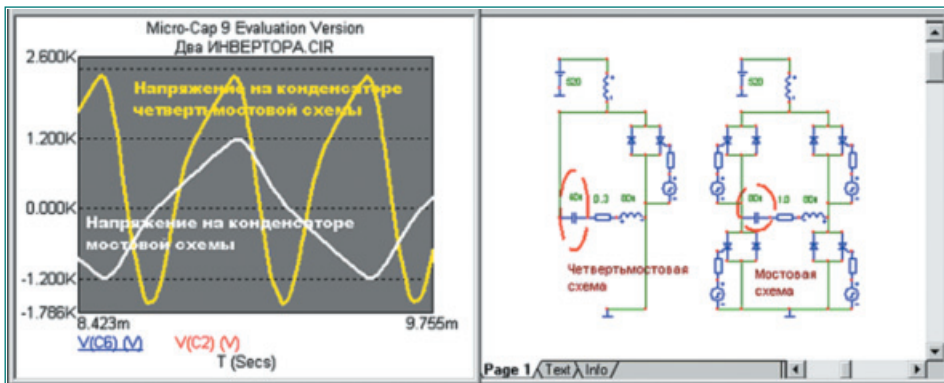


Рис. 7. Напряжение (графики слева) на коммутирующих конденсаторах (выделенных справа) автономных инверторов

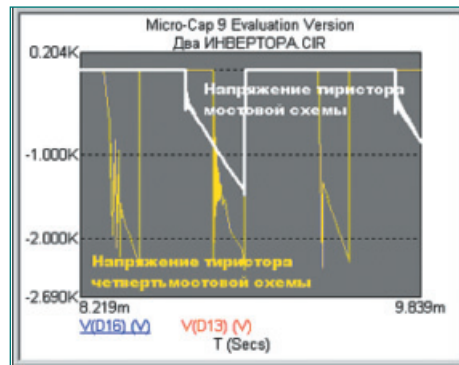


Рис. 9. Форма напряжения на полупроводниковых элементах — тиристорах и диодах автономных инверторов

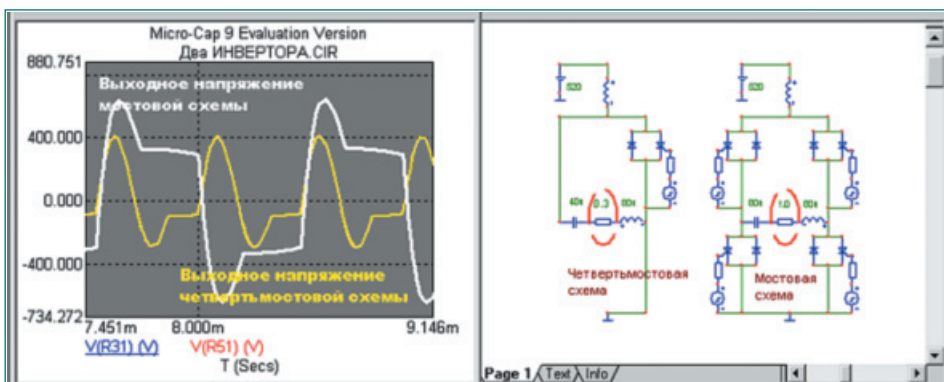


Рис. 8. Сопротивление нагрузки автономных инверторов (выделены справа) и графики выходного напряжения (изображены слева)

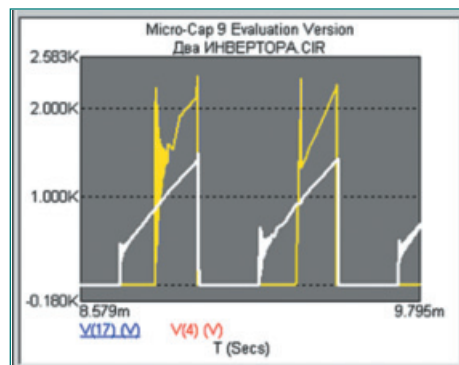


Рис. 10. Напряжение на входном дросселе постоянного тока для схемы мостовой инвертора (белая линия) и для схемы четвертьмостовой инвертора (желтая кривая)

вертора (его относительная величина) изменяется при переменной нагрузке автономного инвертора.

Нагрузка инвертора меняется при нагреве изделия в индукторе. Это свойство называется «раскачкой напряжения». Схема инвертора целесообразна для применения в установках индукционного нагрева металлов, если она мало реагирует на изменение нагрузки величиной «раскачки напряжения». В этом отношении обе схемы равноценны [7].

Уменьшение «раскачки напряжения» обусловлено использованием в схеме автономных инверторов обратных диодов и допустимым изменением параметров нагрузки в пределах обеспечения резонансного режима работы.

На рис. 8 показаны графики выходного напряжения, получаемые в этих схемах.

Величина выходного напряжения первой — четвертьмостовой схемы — существенно ниже, чем у мостовой схемы автономного инвертора. Это во многом определяет ее область применения с эквивалентной нагрузкой меньшей величины, чем у мостовой схемы.

В мостовой схеме величина выходного напряжения ближе к стандартной величине для элементов индукционной нагрузки и электротермических конденсаторов в 500 В, что является определенным ее преимуществом. Отметим еще раз, что сравнение по данному параметру производится при одинаковой величине входного тока автономных инверторов равной мощности.

На рис. 9 представлены графики напряжений на тиристорах и диодах обеих схем. Форма этих

напряжений одинакова, она характерна для инверторов с обратными диодами. Первый скачок напряжения с большой величиной скорости нарастания du/dt объясняется высокой скоростью обрыва обратного тока неуправляемым диодом. Затем следует этап линейного возрастания напряжения до максимальной величины, соответствующей моменту очередного включения тиристора автономного инвертора.

Кратковременные перенапряжения и скачки напряжений на тиристоре сглаживаются демпфирующими цепочками — малогабаритными ВЧ-конденсаторами с повышенным номинальным напряжением.

На рис. 10 показана кривая напряжения на входных дросселях автономных инверторов. Ее форма и амплитудная величина соответствуют напряжению на тиристорах.

На рис. 11 представлен специфический параметр автономных инверторов — напряжение на коммутирующей катушке индуктивности. Этот параметр характеризует затраты на обеспечение электрической изоляции витков катушки.

Технические параметры силовых элементов следует рассматривать с точки зрения изменения их стоимости как эквивалента рыночной экономики. Ориентация российской электротехнической промышленности на интеллектуальную составляющую в стоимости изделий — очередной этап ее развития. Первый этап — производство современных компонентов силовой электроники — отечественная промышленность уступила зарубежным производителям.

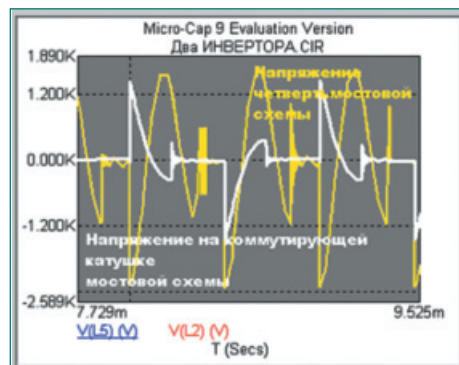


Рис. 11. Амплитуды напряжений на коммутирующих катушках двух схем автономных инверторов

Исходя из изложенного, отметим, что рассмотренные принципиальные схемы АИ определяют следующие свойства:

- мостовой инвертор — это минимальная установленная мощность реактивных элементов, пониженная рабочая частота; четвертьмостовой инвертор — это повышенная рабочая частота;
- «раскачка» напряжения или тока на элементах инвертора при переменной нагрузке от номинальной величины при рабочей нагрузке инвертора, а также способность работать в режиме холостого хода или короткого замыкания нагрузки у этих схем одинакова;



Рис. 12. Электротермический комплекс на основе ТПЧ с мостовой схемой АИ и обратными диодами

- номинальная величина выходного напряжения, по отношению к входному, определяет эффективное применение стандартных компонентов (с номинальным напряжением для силовых конденсаторов, реактивной мощностью выходных высокочастотных трансформаторов). С этой точки зрения лучше мостовая схема.

Справедливости ради отметим, что рассмотренное представление сопротивления нагрузки активным эквивалентом нагрузочного колебательного контура существенно упрощается для применения инвертора в установках индукционного нагрева металлов. При представлении эквивалентной нагрузки автономного инвертора колебательным контуром гармонической ЭДС (что не вызывает затруднений в ходе схемотехнического моделирования) оценивают отклик нагрузки, влияющий на протекание электромагнитных процессов в рассматриваемых схемах [7].

Разумеется, перечисленные свойства являются важными, в основном, для применения автономных инверторов в установках индукционного нагрева металлов токами высокой частоты. Для иного использования рассмотренных автономных инверторов (в схемах электропривода) оценки свойств могут быть другими.

Тиристорные инверторы в установках индукционного нагрева реализуют закон электромагнитной индукции, для них важны поверхностный эффект и эффект близости, и они эксплуатируются в условиях существенного изменения электрофизических свойств металла в процессе нагрева.

На рис. 12 и 13 изображены установки индукционного нагрева, созданные на базе ТПЧ с тиристорными автономными инверторами, построенными на основе рассмотренных выше схем.

Первый промышленный комплекс для индукционного нагрева металлов создан в 1971 г. на основе изобретения мостового резонансного инвертора по схеме Кацнельсона [1].

Тиристорные преобразователи, разработанные в 70-х годах прошлого столетия, имели значительные габариты и большой вес (рис. 12). Эти параметры на то время не являлись приоритетом. Первые ТПЧ промыш-

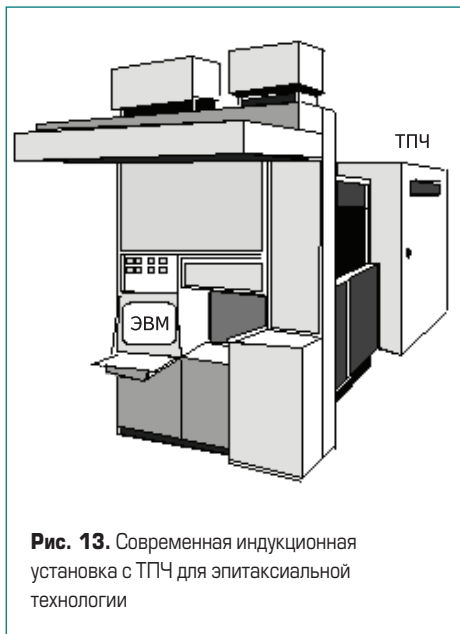


Рис. 13. Современная индукционная установка с ТПЧ для эпитаксиальной технологии

ленного применения использовались для методического нагрева заготовок в кузнечном индукционном нагревателе (КИН). Потом эти ТПЧ широко применялись для индукционной плавки металлов в печах типа ИСТ 016.

На рис. 13 показан общий вид современного комплекса нагрева ТВЧ, работающего под управлением ЭВМ. Индукционный комплекс используется для эпитаксиальной технологии в производстве элементов микроэлектроники. Автономный инвертор выполнен по несимметричной одноконтурной схеме с обратным диодом (четвертьмостовой АИ), рассмотренной выше.

Диаграмма совершенствования технических характеристик ТПЧ для индукционного нагрева с момента их первого промышленного применения приведена на рис. 14. Графики КПД, веса и габаритов тиристорных преобразователей приведены в относительных единицах, за базовую величину приняты соответствующие параметры первых разработок. Диаграмма составлена нами на основе экспертной оценки.

Габариты и вес современных ТПЧ, определяющие их стоимость, и коэффициент использования силовых элементов по установленной мощности значительно снижены по сравнению с первыми разработками.

Увеличение стоимости индукционных комплексов сегодня определяется, в первую очередь, постоянным ростом цены на конструкционные материалы — медь, сталь электротехническую, современную изоляцию.

Заключение

1. При сравнении стоимости автономных инверторов для установок индукционного нагрева металлов в качестве обобщенного критерия предлагается производство выходной мощности на номинальную частоту выходного тока.
2. Эффективность использования силовых элементов в автономных инверторах с одинаковыми обобщенными критериями предлагается оценивать по доли стоимости основных тиристорных и обратных дио-

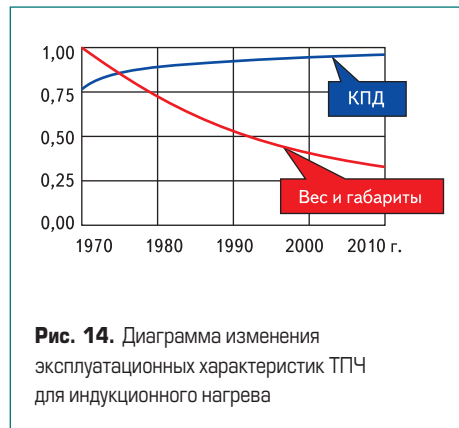


Рис. 14. Диаграмма изменения эксплуатационных характеристик ТПЧ для индукционного нагрева

дов, силовых конденсаторов и катушек индуктивности.

3. В ходе сравнительного анализа выявлены рациональные области использования типовых схем тиристорных автономных инверторов при эффективной нагрузке элементов по установленной мощности и напряжении питания 520 В. Четвертьмостовая схема обеспечивает повышенную частоту выходного тока (до 20 кГц) при выходной мощности до 40 кВт. Мостовой тиристорный инвертор эффективен для применения в установках индукционного нагрева большой мощности (до 400 кВт) и пониженной частоте выходного тока (до 2 кГц).
4. Массо-габаритные и энергетические показатели инверторно-индукционных силовых установок взаимосвязаны, но они еще не достигли предельных значений, что является основным направлением совершенствования таких установок.

Продолжение следует

Литература

1. Независимый инвертор. АС № 235177. Кацнельсон С. М., Ухов В. С. БИ № 5, 1969.
2. Патент № 2215361. Мостовой инвертор. Зинин Ю. М., Ветошкин А. В., Ройзман Ю. П. 2003.
3. Тиристорные преобразователи высокой частоты. Беркович Е. И., Ивенский Г. В., Иоффе Ю. С., Матчак А. Т., Моргун В. В. Л.: Энергия, 1973.
4. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Ройзман П. С., Зинин Ю. М., Марон В. М., Иванов А. В. Метод базового режима для инженерного расчета автономных инверторов с обратными диодами // Электромеханика. Известия вузов. 1981. № 4.
6. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
7. Валиуллина З., Зинин Ю. Проектирование тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса с выходным трансформатором // Силовая электроника. 2007. № 3.