

Исследование процессов пуска

тиристорного автономного мостового инвертора с удвоением частоты

В статье приведены результаты исследований переходных процессов пуска силовой схемы тиристорного мостового инвертора с обратными диодами и удвоением частоты, широко применяемой в тиристорных преобразователях частоты для установок индукционного нагрева металлов токами повышенной частоты. Пусковые процессы при включении являются наиболее уязвимым этапом работы автономного инвертора и во многом определяют его надежность.

В статье исследованы вопросы влияния величины емкости разделительного конденсатора на надежность процесса пуска инвертора. Надежность пуска определена как превышение времени, предоставляемого на восстановление управляемости силовым тиристорам мостовой схемы автономного инвертора по отношению к их номинальной (паспортной) величине.

Рассмотрено влияние на характер протекания пусковых процессов нелинейного дросселя автономного инвертора, обеспечивающего снижение коммутационных перенапряжений на тиристорах.

Семен Шапиро,
д. т. н., профессор

svshap@ufacom.ru

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Владимир Терешкин,
к. т. н.

tvm53@mail.ru

Введение

Электромагнитные процессы пуска в силовой схеме автономного инвертора протекают при каждом его включении. Такие же процессы воспроизводятся и в ходе расчетов, при исследовании схемотехнической модели автономного инвертора в программах-симуляторах, например Micro-Cap.

Установившиеся режимы работы автономных инверторов исследуются расчетными либо схемотехническими методами при анализе электромагнитных процессов, при этом выполнение условий квазиустановившегося режима означает прекращение переходных процессов пуска [1–5]. С другой сто-

роны, реализация рассчитанных, даже оптимальных, режимов тиристорного инвертора требует проверки их осуществимости с момента пуска.

Схемотехнические методы исследования математических моделей автономных инверторов как нелинейных объектов основаны на применении стандартных PSpice-моделей компонентов. В настоящее время авторами используется демо-версия программы Micro-Cap 10, которая эффективна для исследований переходных процессов, в том числе и процесса пуска силовых схем автономных инверторов.

Описание автономного мостового тиристорного инвертора с обратными диодами и удвоением частоты и его схемотехнической PSpice-модели

На рис. 1 показан вид основной страницы Page 1 рабочего поля программы Micro-Cap 10, на которой изображено исходное состояние схемотехнической модели автономного мостового тиристорного инвертора с удвоением частоты. Схемотехническая PSpice-модель показывает отсутствие входного тока в инверторе. Поэтому в исходном состоянии расчетной модели отсутствует ток в индуктивностях и напряжение на конденсаторах инвертора, за исключением конденсатора C2, предварительно заряженного до величины напряжения питания ($IC = 500$ при $DC = 500$ В). Такая величина напряжения необходима для обеспечения устойчивости протекания процессов пуска инвертора [1].

Характер переходных процессов схемотехнической модели от момента пуска до наступления квазиустановившегося режима изучен недостаточно, поэтому авторами представлены результаты новых исследований, связанных с рассмотрением процессов при коммутации силовых вентилях.

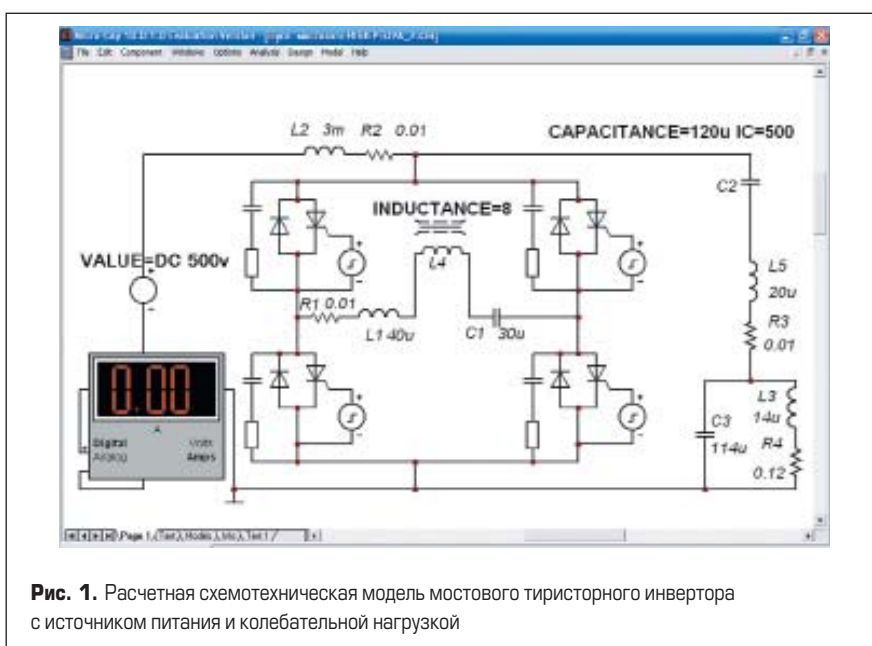


Рис. 1. Расчетная схемотехническая модель мостового тиристорного инвертора с источником питания и колебательной нагрузкой

Графическое изображение силовых компонентов схемотехнической модели повторяет принципиальную схему исследуемого автономного тиристорного мостового инвертора с удвоением частоты, это является несомненным достоинством симулятора Micro-Cap.

Источник питания ($DC = 500\text{ В}$) подключен к тиристорно-диодной мостовой схеме инвертора; в ней происходит формирование колебательного тока повышенной частоты, который через разделительный конденсатор, удваивающий рабочую частоту инвертора, протекает через нагрузку, настроенную в резонанс с первой или второй гармоникой выходного тока.

Рассмотрим особенности исследования процессов пуска, которые характеризуют переходные режимы инвертора с установлением квазиустановившейся величины, обычно характеризуемой максимальной величиной «раскачки» напряжения. «Раскачкой» называется превышение напряжения на силовых элементах инвертора над напряжением источника питания. Величина раскачки определяется эквивалентным сопротивлением нагрузки инвертора, включенной в выходную цепь колебательного тока повышенной частоты.

Нагрузка инвертора — индуктор высокочастотной установки с компенсирующим его реактивную мощность конденсатором — подключена последовательно по переменному току относительно диагонали тиристорного моста, через разделительный конденсатор.

Рассматриваемая схема обладает полезным свойством удвоения частоты тока в нагрузке по отношению к выходной частоте инвертора. В этом случае колебательный контур нагрузки настраивается на вторую гармонику выходной частоты инвертора. Свойство удвоения частоты позволяет использовать в нем сравнительно дешевые низкочастотные тиристоры. На надежность пуска удвоение частоты инвертора не влияет.

В цепь источника постоянного тока схемотехнической модели (рис. 1) включен цифровой амперметр, показывающий величину входного тока в конце расчетного интервала. К тиристорам и диодам схемотехнической модели инвертора подключены резисторы и конденсаторы R, C — элементы демпфирования коммутационных перенапряжений. Внутренние сопротивления катушек индуктивности ($L1, L2, L3$ и $L4$) показаны в изображении, отличном от резисторов. Наличие последних компонентов не является обязательным, а лишь уточняет результаты исследований схемотехнической модели.

Ниже приведем особенности схемотехнической модели в программе Micro-Cap 10 Evaluation Version [.cir], которая, как показано выше, практически соответствует изображению принципиальной электрической схемы мостового инвертора.

На рис. 1 показан нелинейный дроссель насыщения $L4$ с замкнутым ферритовым сердечником без зазора с обмоткой. Конструкция и назначение этого дросселя описаны в [6].

На схемотехнической модели показаны следующие основные компоненты:

- PSpice-модель источника питания постоянного тока с величиной напряжения 500 В , с линейной индуктивностью $L2 = 3\text{ мГн}$, с внутренним сопротивлением $R2 = 0,01\text{ Ом}$, с измерителем тока в виде цифрового амперметра.
- Модель мостового тиристорного инвертора с обратными диодами, к одной диагонали которого подключен источник питания, а в другой диагонали включены коммутирующие элементы — линейная ($L1 = 40\text{ мГн}$) индуктивность с внутренним сопротивлением $R4 = 0,01\text{ Ом}$, нелинейная ($L4$) индуктивность с числом витков $INDUCTANCE = 8$ с ферромагнитным сердечником и коммутирующий конденсатор $C1 = 30\text{ мкФ}$. PSpice-модель ферромагнитного сердечника будет приведена ниже, как и результаты исследований на протекание электромагнитных процессов пуска.
- Модель разделительного конденсатора ($CAPACITANCE = 120\text{ мкФ}$ $IC = 500$), с номинальной емкостью конденсатора $C2 = 120\text{ мкФ}$, с начальной величиной напряжения 500 В , линейной индуктивностью $L5 = 20\text{ мГн}$, внутренним сопротивлением $R3 = 0,01\text{ Ом}$.
- Последовательно в цепь разделительного конденсатора автономного инвертора включен резонансный колебательный контур повышенной добротности, $C3 = 114\text{ мкФ}$, $L3 = 14\text{ мГн}$ и $R4 = 0,12\text{ Ом}$, симулирующий колебательную нагрузку автономного инвертора, настроенную на вторую гармонику выходного тока мостового инвертора.

Мощность и частота инвертора — это основные эксплуатационные характеристики, которые определяются из расчетов реактивных элементов схемы инвертора и эквивалентного сопротивления нагрузки при выполнении условий коммутации тиристоров, с учетом наличия обратных диодов [7–10].

Условием моделирования инвертора номинальной мощности является совпадение резонансной частоты нагрузочного колебательного контура со второй гармоникой выходного тока. Для этого параметры PSpice-моделей источников импульсов управления тиристорами инвертора установлены таким образом, чтобы импульсы по двум каналам управления противофазными тиристорами мостовой схемы были сдвинуты на полпериода частоты управления инвертором.

Резонансная частота колебательного контура нагрузки инвертора определена из частотного анализа схемотехнической модели. Другие особенности разработанной схемотехнической модели, в том числе параметры PSpice-модели тиристоров, диодов, импульсных источников управления тиристорами и т. д., описаны в [1]. Макросы тиристоров и модели диодов инвертора стандартные. Они учитывают классификационные параметры тиристоров и диодов по току, напряжению, времени восстановления управляемости и др.

Параллельно каждому тиристоры с диодом для мостовой схемы инвертора на его схемотехнической модели присутствуют демпфирующие цепочки, состоящие из конденсатора

и резистора, предназначенные для ограничения коммутационных перенапряжений. Они уменьшают амплитуду пиков напряжений, возникающих на индуктивностях инвертора при обрыве обратного тока встречными диодами, и уменьшают крутизну нарастания передних фронтов прямого напряжения на тиристорах.

Итак, в конечном итоге, в схемотехнической модели тиристорного инвертора используются следующие стандартные компоненты: Resistor = 16; Inductor = 5; Capacitor = 7; Diode = 16; NPN = 4; PNP = 4; Pulse source = 4; Macro=4; VSpice=1; K=1; ANIMATEDMETER=1. Следует отметить, что тиристоры представлены в виде макромоделей X1–X4, в составе которых использованы PSpice-модели NPN- и PNP-транзисторов; модели диодов стандартные, из библиотеки Micro-Cap 10; VSpice — модель источника постоянного тока; K = 1 — модель нелинейного ферромагнитного сердечника; ANIMATEDMETER = 1 — анимированный прибор (амперметр).

PSpice-параметры макроса тиристора для схемотехнической модели тиристорного инвертора редактируются на панели из библиотечного файла SCR (Silicon Controlled Rectifier Macro) и указываются в файле текстового описания изображения на странице Page 1 схемотехнической модели, приведенной выше.

Включение тиристоров схемотехнической модели инвертора осуществляется импульсами управления, формируемыми с помощью PSpice-модели управляемых генераторов импульсов специальной формы.

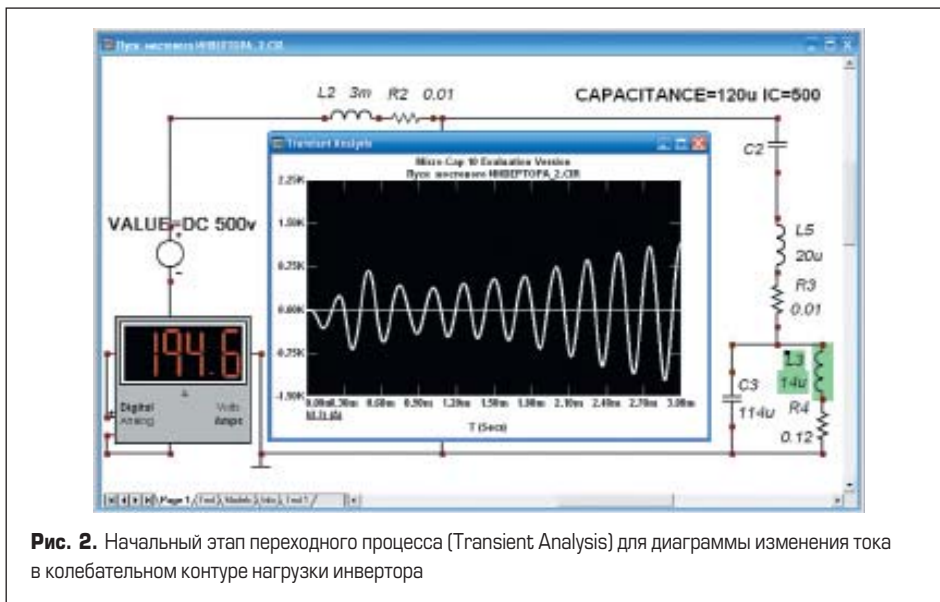
Источники импульсных сигналов, имитирующие систему управления ТПЧ, симметричны во времени и управляют включением противофазных тиристоров мостовой схемы инвертора. Эти модели позволяют изменять следующие параметры импульсов: длительности фронтов, длительность импульсов, их амплитуду и частоту повторения. Временные диаграммы импульсов управления инвертором повторяют реальную форму выходных сигналов системы управления инвертором. Параметры импульсного источника схемотехнической PSpice-модели и временная диаграмма (Voltage vs. Time) для управления тиристорами мостового инвертора повышенной частоты приведены в [1].

Параметры PSpice-модели обратных диодов в модели автономного инвертора следующие:

```
*** From file C:\Program Files\Spectrum Software
MC10demolibray\UTILITY.LBR
*** Generic Diode
.MODEL $GENERIC D (LEVEL=2 IS=8n N=2
BV=1000 RS=400m TT=1n CJO=2.5p VJ=700m
M=100m RL=5G).
```

Это описание полупроводникового диода второго уровня с величиной рабочего напряжения, соответствующего 10 классу.

После выбора и размещения элементов на рабочем поле и задания параметров схемотехнической модели инвертора можно приступить к формулированию задания на расчет переходных процессов пуска.



тротермической установки для случая применения автономного инвертора для индукционного нагрева металлов. Установившаяся величина тока в колебательной нагрузке инвертора может составлять несколько тысяч ампер. Такая величина тока индуктора вызывает соответствующий эффект «настила» электрической мощности в нагревании индукционным способом ферромагнитного тела, например при закалке.

Временная диаграмма колебательного тока нагрузки, приведенная на рис. 2, иллюстрирует начальный этап возрастания тока. На ней «откликом» процессов пуска в инверторе является особая точка, соответствующая минимуму амплитуды тока. Как будет показано дальше, этот минимум соответствует особому моменту времени в процессе пуска инвертора, наиболее опасному с точки зрения потери его устойчивости.

На этапе предыдущих исследований [1] мы выявили целесообразность предварительного заряда разделительного конденсатора C2 до величины, близкой к напряжению источника питания инвертора. Это условие обеспечивает непрерывность протекания процессов пуска инвертора и минимально необходимое время восстановления управляемости при очередных коммутациях тиристорov. Отметим, что колебательная форма тока обеспечивает повышенную стабильность работы тиристорov мостового инвертора.

Исследованию созданной схмотехнической модели предшествует определение длительности протекания переходного (пускового) режима модели инвертора при его включении с ненулевым напряжением на разделительном конденсаторе C2.

На рис. 3 приведены временные диаграммы напряжений на реактивных элементах мостового инвертора — коммутирующем конденсаторе C1, разделительном конденсаторе C2 и конденсаторе C3, который компенсирует реактивную мощность индуктора, придавая эквивалентной нагрузке инвертора омический характер.

Проводимые с помощью программы Micro-Cap 10 исследования переходных процессов пуска (Transient Analysis) с различными начальными условиями на компонентах полученной схмотехнической модели представляются полученными расчетными временными диаграммами, приведенными ниже.

Схмотехнические исследования электромагнитных процессов пуска в автономном тиристорном мостовом инверторе

На рис. 2 представлены результаты анализа переходных процессов (Transient Analysis) в расчетной модели инвертора; показан начальный этап временной диаграммы изменения тока в колебательном контуре нагрузки инвертора; приведены показания анимированного прибора; выделен отдельный компонент схмотехнической модели — индуктивность индуктора. Рис. 2 показывает основное назначение автономного инвертора как преобразователя постоянного тока в переменный ток повышенной частоты, циркулирующий в индукторе.

Источнику питания инвертора в виде PSpice-модели (модели источника напряжения) приданы свойства источника тока, так как последовательно с ним включена линейная индуктивность значительной величины $L2 = 3 \text{ мГн}$ (входной дроссель), поэтому рассматриваемый автономный инвертор представляет собой инвертор, формирующий импульсы выходного тока повышенной частоты. Импульсы тока «раскачивают» резонансный колебательный контур повышенной добротности, вызывая в нем возрастание колебательного тока нагрузки. Эти процессы инерционны, и они заканчиваются установлением постоянной амплитуды колебаний тока в нагрузке.

Чем выше добротность контура нагрузки при уменьшении ее активного сопротивления, тем больше установившаяся величина тока в нагрузке и, соответственно, больше длительность интервала переходного процесса пуска автономного инвертора.

На рис. 2 прибор показывает ток инвертора, равный 194,6 А. За время переходных процессов, независимо от начальных условий пуска, в модели достигается квазистационарное состояние электромагнитных процессов, характеризующее величину раскачки напряжения в инверторе и его входную мощность. Рисунок иллюстрирует назначение автономного инвертора в составе тиристорного преобразователя частоты.

Далее будет отдано предпочтение физическому описанию протекающих процессов в схеме инвертора перед описанием электромагнитных процессов как результата схмотехнических исследований.

На рис. 2 слева анимированный прибор показывает величину постоянного тока в инверторе через 3 мс (время окончания данного расчетного интервала) после включения инвертора. Справа показан резонансный колебательный контур нагрузки с выделенной индуктивностью $L3 = 14 \text{ мкГн}$, представляющей индуктор элек-

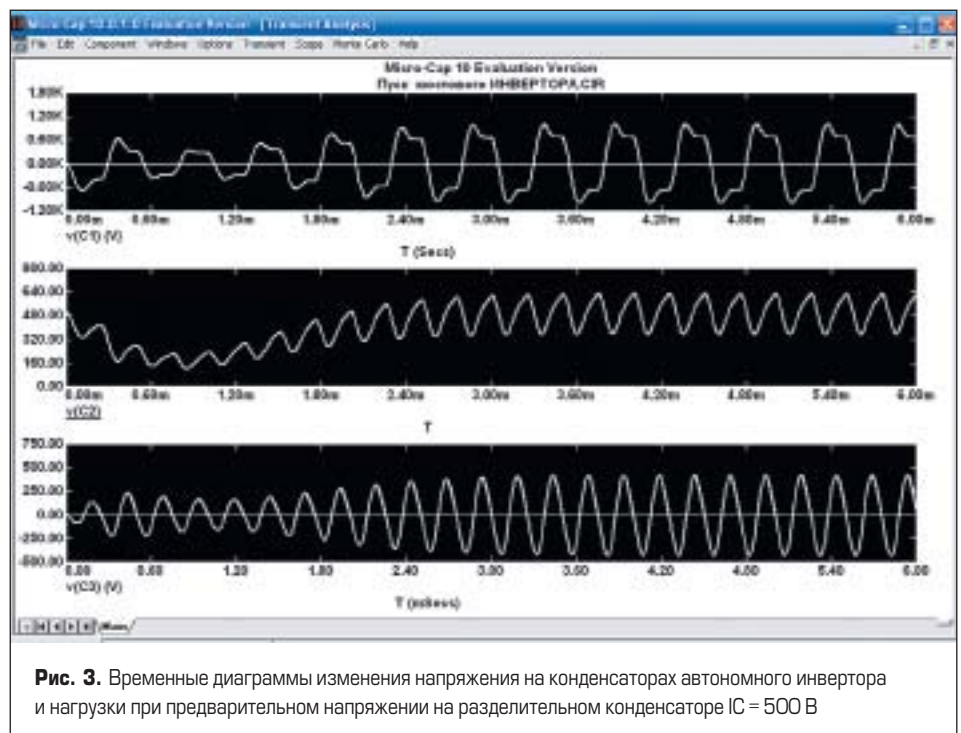


Рис. 3. Временные диаграммы изменения напряжения на конденсаторах автономного инвертора и нагрузки при предварительном напряжении на разделительном конденсаторе IC = 500 В

Время расчета временных диаграмм, приведенных на рис. 3, составляет 6 мс. Обычно принимают, что переходной процесс пуска инвертора заканчивается, когда отклонение параметров временных диаграмм тока или напряжения меньше 3–5% от максимальной величины. Это начало для квазиустановившихся процессов в инверторе, когда в нем справедливы расчетные интегральные соотношения. По этим графикам для установившихся процессов в схемотехнической модели устанавливается ее соответствие физической модели инвертора. На данном этапе проверяется отсутствие формальных ошибок в схемотехнической модели, которые определяются встроенной системой диагностики и подсказок Micro-Cap, и устанавливаются необходимые параметры расчета. Субъективным критерием верности схемотехнической модели является возможность ее расчета с необходимой точностью на достаточно длительном интервале времени, ограниченном вычислительными ресурсами системы.

V(C1) — временная диаграмма формы напряжения, типичная для мостового инвертора, симметричная относительно оси времени. Амплитудная величина напряжения этой диаграммы характеризует номинальную величину действующих напряжений на всех элементах тиристорного инвертора. Эта величина, в свою очередь, характеризует «раскачку» напряжения при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки — кратность превышения этого напряжения над напряжением источника питания.

V(C2) — пульсирующее напряжение с начальной величиной и установившимся средним значением, равным напряжению источника питания. Амплитуда пульсаций должна быть ограничена, что весьма просто достигается увеличением установленной емкости конденсатора, но его габариты и стоимость при этом неоправданно возрастают, так как выходная мощность инвертора практически не увеличивается.

V(C3) — временная диаграмма практически синусоидального напряжения на конденсаторе нагрузки, показанная на рис. 2 для меньшего интервала времени.

Из диаграмм можно заключить, что переходные электромагнитные процессы в этом инверторе достаточно исследовать на интервале 0–2 мс. Временные диаграммы характеризуют условия работы силовых элементов тиристорного инвертора и определяют рациональную область его применения.

Одним из достоинств мостовой схемы резонансного инвертора является ее достаточно надежный пуск, контроль которого инструментальными средствами затруднен, поэтому далее более детально рассмотрим форму напряжения на разделительном конденсаторе инвертора C2 и тиристорах.

На рис. 4 приведена временная диаграмма изменения напряжения на тиристоре схемотехнической модели инвертора на интервале пуска. Тонкой линией показано изменение напряжения на разделительном конденсаторе, служащее основной причиной уменьшения времени восстановления на тиристоре.

Временная диаграмма напряжения на разделительном конденсаторе C2 в процессе пу-

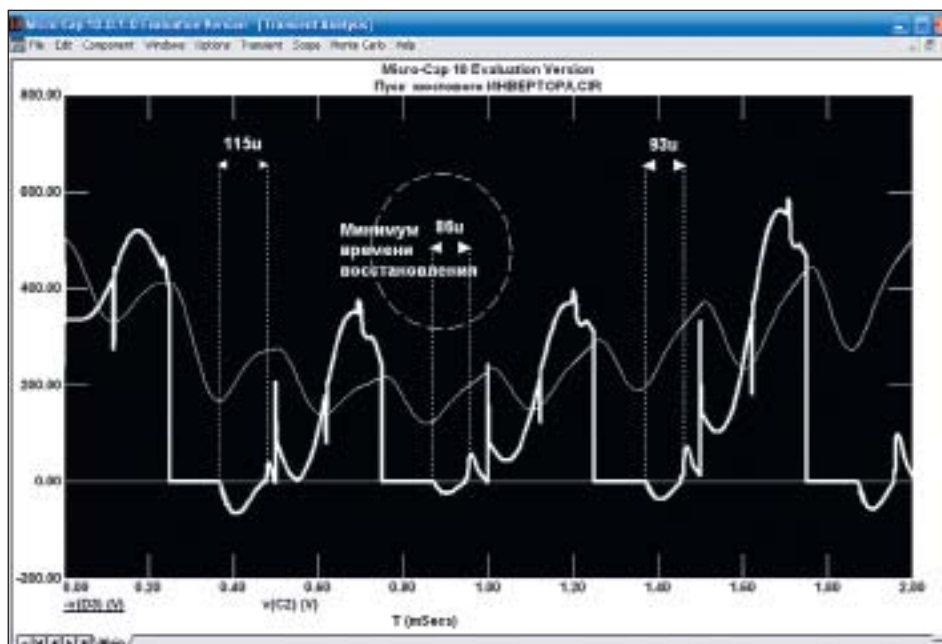


Рис. 4. Временная диаграмма изменения напряжения на тиристоре схемотехнической модели инвертора на интервале пуска

ска показывает пульсирующее напряжение от начальной величины $U_C = 500$ В. В процессе пуска среднее значение этого напряжения уменьшается и затем возрастает. После окончания переходных процессов в инверторе на этом конденсаторе устанавливается среднее значение, равное напряжению источника питания (Value DC 500v на рис. 1).

Номинальная емкость разделительного конденсатора C2 была определена ранее и равна 120 мкФ. Из временной диаграммы, показанной яркой линией, следует, что первой коммутации тиристора соответствует время восстановления управляемости, равное 115 мкс.

Минимальное расчетное время восстановления составляет 86 мкс. Поскольку коммер-

ческие тиристоры инвертора с лучшим сочетанием стоимости, качества и параметров имеют номинальную (паспортную) величину времени восстановления управляемости в 30–50 мкс, то двукратный запас по этому параметру достаточен.

Заметим, что в следующих расчетных интервалах время восстановления управляемости, требуемое тиристору, монотонно возрастает, следовательно, очередная его коммутация будет успешной. На этой временной диаграмме явно выражены интервалы коммутации в схемотехнической модели автономного инвертора.

На рис. 5 показана диаграмма изменения времени, предоставляемого тиристору на вос-

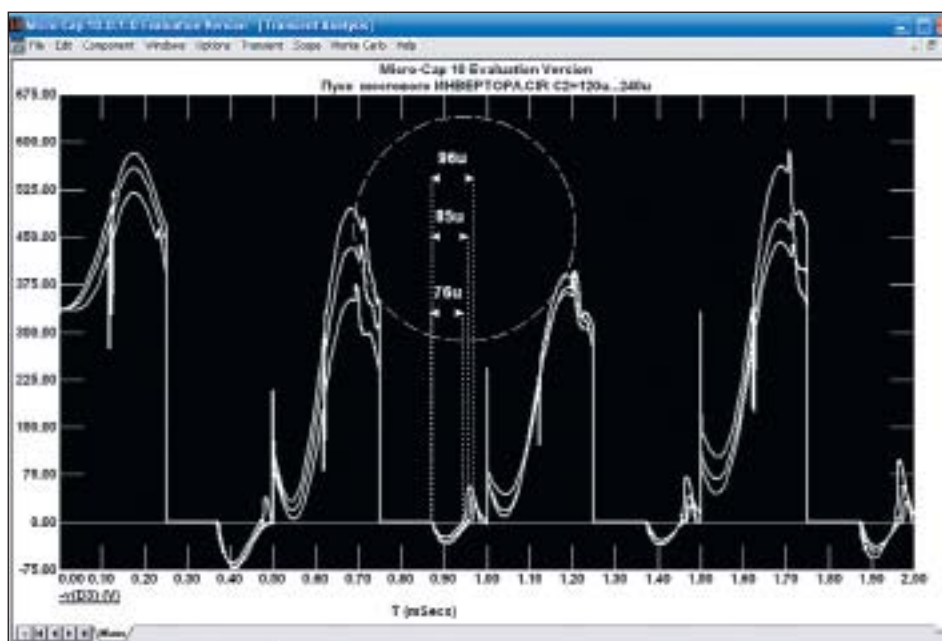


Рис. 5. Изменение времени восстановления, предоставляемого тиристору, при изменении емкости разделительного конденсатора на интервале пуска автономного инвертора

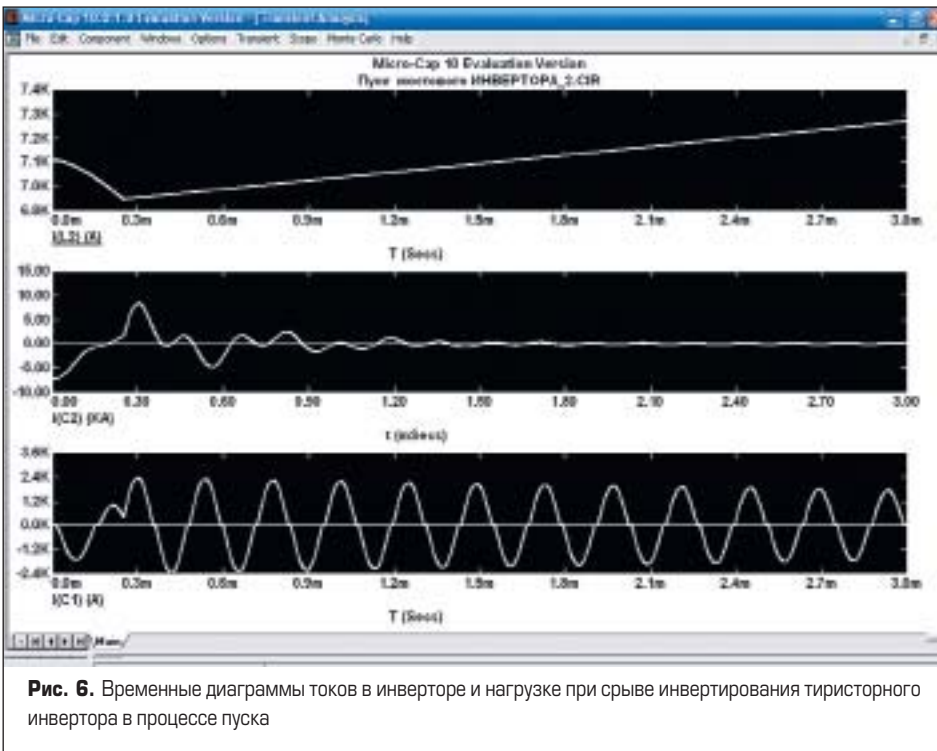


Рис. 6. Временные диаграммы токов в инверторе и нагрузке при срыве инвертирования тиристорного инвертора в процессе пуска

становление управляемости, при изменении емкости разделительного конденсатора на интервале пуска автономного инвертора при фиксированных значениях 120, 180 и 240 мкФ.

Временная диаграмма показывает, что интересующая нас величина времени восстановления управляемости тиристора изменяется незначительно (от 76 до 96 мкс) при изменении величины емкости разделительного конденсатора и, таким образом, на практике может не учитываться.

В настоящее время в технической литературе не устранена неоднозначность в терминах времени восстановления, предоставляемого схемой инвертора, как

интервала времени существования отрицательного напряжения на тиристоре, и времени восстановления тиристора как классификационного параметра, характеризующего интервал времени, в течение которого необходимо прикладывать к тиристору отрицательное напряжение, чтобы он не вошел в режим при переходе напряжения на нем в положительную полярность. Эти определения уточняются на практике. Условия работы тиристорных инверторов определяются конкретной схемой, режимами работы и другими особенностями силовой схемы тиристорного инвертора.

Однозначное определение времени восстановления тиристора усложняется его

зависимостью от температуры структуры, величины обратного напряжения, скорости нарастания прямого восстанавливающего напряжения и совокупности других факторов. В частности, и по этой причине коэффициент «запаса» по данным параметрам для силовых полупроводниковых приборов тиристорных инверторов составляет кратные значения – два, три и больше [11].

С другой стороны, прогресс в технологии производства тиристорных инверторов практически устранил ограничения по такому параметру, как критическая скорость нарастания прямого восстанавливающего напряжения. Для инверторов с обратными диодами достаточно ограничивать этот параметр схемными методами: применением демпфирующих цепочек и включением нелинейного дросселя в цепь коммутации.

Влияние нелинейного дросселя в цепи коммутации тиристорных инверторов на процесс пуска автономного инвертора

На рис. 6 приведены временные диаграммы токов в инверторе и нагрузке при срыве инвертирования тиристорного инвертора в процессе пуска.

Для моделирования процесса срыва инвертирования на разделительном конденсаторе инвертора полярность напряжения была изменена на противоположную. Срыв инвертирования приводит к значительному возрастанию входного тока инвертора, скорость нарастания которого ограничена индуктивностью дросселя постоянного тока. В реальности для этого случая сработает быстродействующая защита, отключающая источник питания от инвертора [11].

Верхняя диаграмма показывает изменение тока входного дросселя — линейной индуктивности L2. Средняя иллюстрирует поведение тока нагрузки инвертора, протекающего через разделительный конденсатор, — i(C2). Нижняя показывает ток i(C1) в колебательном контуре коммутации инвертора.

В ходе физических испытаний мостового автономного инвертора было выявлено, что наличие нелинейного дросселя значительно повышает надежность пуска преобразователя с различной нагрузкой. Рассмотрим эти процессы несколько подробнее.

На рис. 7 приведены параметры магнитного сердечника нелинейного дросселя автономного инвертора. Кольцевой ферритовый сердечник выполнен из материала 3F3 с геометрическими параметрами: сечение сердечника (AREA) — 30 см; средняя длина магнитной линии (PATH) — 20 см; воздушный зазор (GAP) — 0 см. В окне сердечника размещены восемь витков обмотки, показанной на схематической модели в виде индуктивности.

На рис. 8 показана кривая насыщения (вверху) ферромагнитного сердечника нелинейного дросселя, ниже приведена временная диаграмма тока в обмотке нелинейного дросселя при самоликвидации срыва инвертирования.

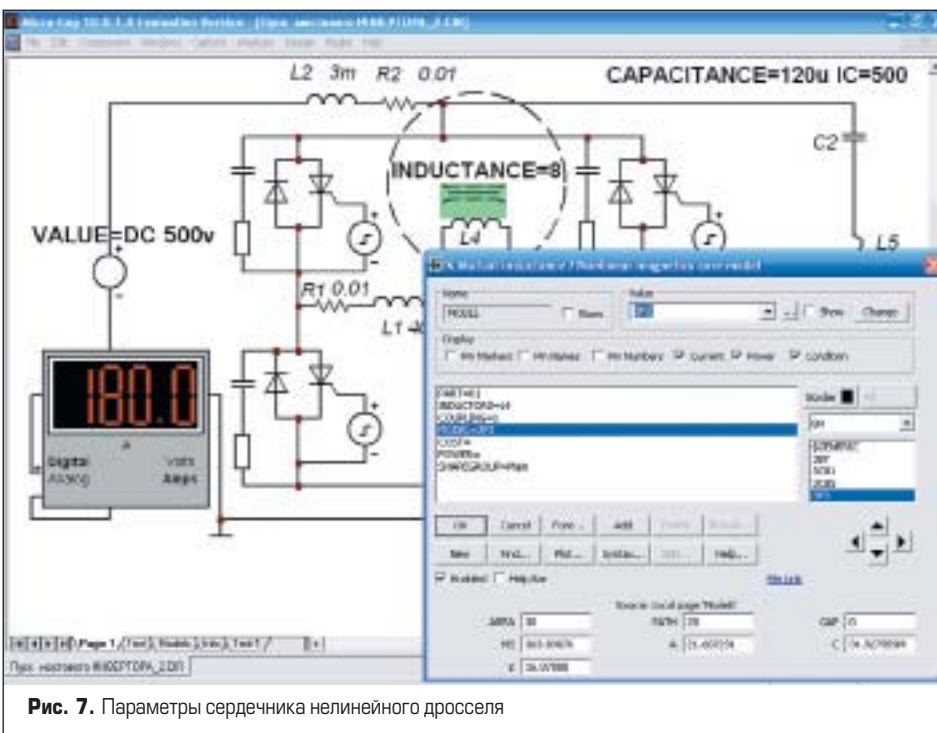


Рис. 7. Параметры сердечника нелинейного дросселя

PSpice-модель ферритового сердечника дросселя формирует нелинейные свойства его кривой намагничивания. Основные характеристики нелинейного сердечника дросселя насыщения и эффективность его применения по основному назначению в автономном инверторе повышенной частоты приведены в [6]. Там же рассмотрена тороидальная конструкция нелинейного дросселя без зазора и приведены его основные параметры. Особенностью расчета является задание числа витков обмотки дросселя, так как этот параметр определяется, в первую очередь, конструкцией силовой обмотки.

Основным назначением нелинейного дросселя является улучшение коммутационных перенапряжений на тиристорах путем снижения скорости изменения протекающего тока. В данной статье особенности применения нелинейного дросселя рассмотрены применительно к его влиянию на процессы пуска.

Нижняя диаграмма на рис. 8 показывает изменение тока в обмотке дросселя при пуске автономного инвертора. Нелинейные свойства дросселя особенно проявляются при уменьшении прикладываемого к нему напряжения. При минимальной величине напряжения время задержки, согласно временной диаграмме, значительно увеличивается и достигает 55 мкс, что меняет интервалы коммутации силовых вентилялей и, соответственно, характер протекания электромагнитных процессов в инверторе. Указанные процессы не детерминированы, они трудно поддаются моделированию и называются самоликвидацией срыва инвертирования. Самоликвидация срыва автономного инвертора — процесс вероятностный, и поэтому, чтобы его смоделировать в схемотехнической модели, необходимо было, например, изменить полярность напряжения на разделительном конденсаторе перед пуском инвертора.

На рис. 9 приведены временные диаграммы входного тока инвертора и напряжений на противофазных тиристорах при самоликвидации срыва инвертирования.

После интервала проводимости синфазных тиристорov ток встречного направления проводят обратные диоды, в этом интервале тиристор восстанавливает управляющие свойства; таким образом, осуществляется «мягкая» колебательная коммутация тиристорov инвертора, способствующая самоликвидации возможного срыва инвертирования.

Интервал времени восстановления никогда не должен быть меньше (с определенным коэффициентом запаса) паспортной величины времени восстановления управляемости тиристора, это основное условие успешного пуска и надежной работы тиристорного инвертора. Однако в некоторых случаях после срыва инвертирования коммутация тиристорov может быть продолжена, этому способствует значительная индуктивность входного дросселя или наличие в колеба-

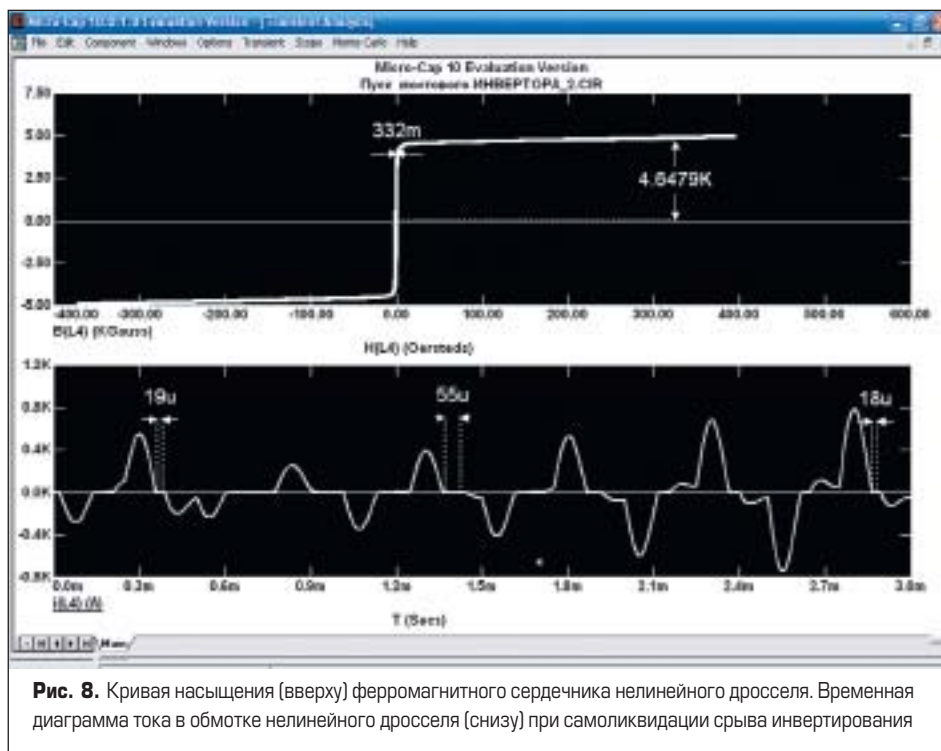


Рис. 8. Кривая насыщения (вверху) ферромагнитного сердечника нелинейного дросселя. Временная диаграмма тока в обмотке нелинейного дросселя (снизу) при самоликвидации срыва инвертирования

тельной цепи инвертора небольшого нелинейного дросселя, как в рассмотренном случае.

На рис. 10 приведены временные диаграммы входного тока и напряжений на противофазных тиристорах мостовой схемы автономного инвертора от момента включения до наступления квазиустановившегося режима.

Временные диаграммы получены при анализе переходных процессов в схемотехнической модели инвертора с разделительным конденсатором $C2 = 120$ мкФ и нулевым начальным напряжением $U_C = 0$.

Последние диаграммы иллюстрируют электромагнитные процессы при включе-

нии автономного инвертора, при которых в тиристорах на всем расчетном интервале сохраняется определенный порядок коммутационных интервалов, сдвинутых на 180° . Монотонное изменение тока дросселя показывает активный характер нагрузочного контура. Так как подача импульсов управления на тиристоры реального инвертора осуществляется после включения питания с временной задержкой, то в течение этого времени разделительный конденсатор $C2$ заряжается от источника питания, и включение тиристорov инвертора, как рассмотрено ранее, происходит при положительном напряжении заряда на разделительном конденсаторе.

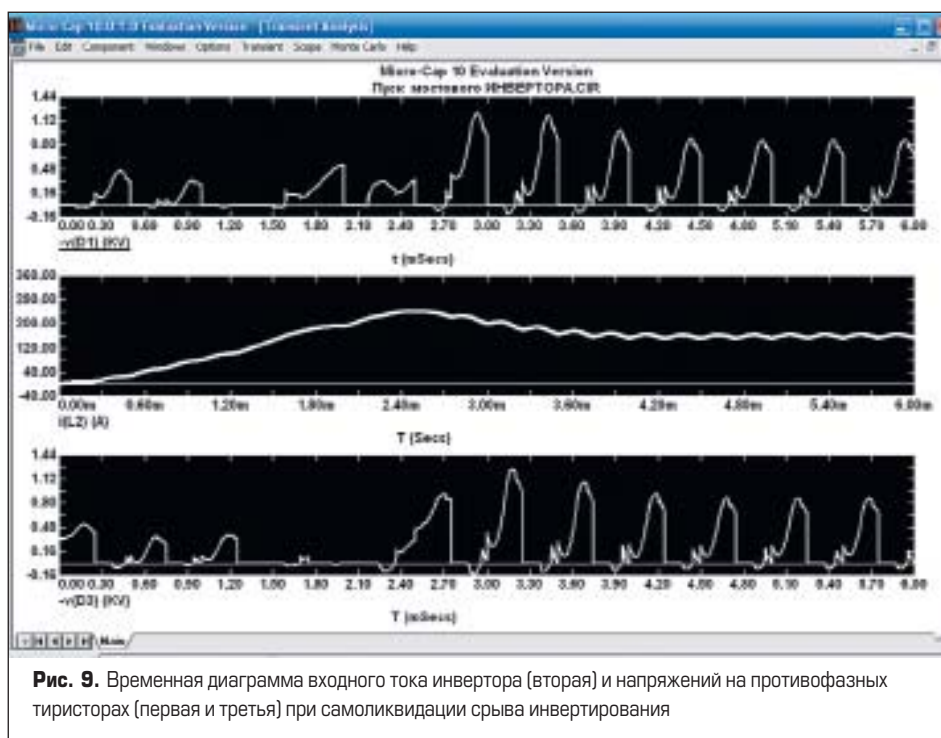


Рис. 9. Временная диаграмма входного тока инвертора (вторая) и напряжений на противофазных тиристорах (первая и третья) при самоликвидации срыва инвертирования

Литература

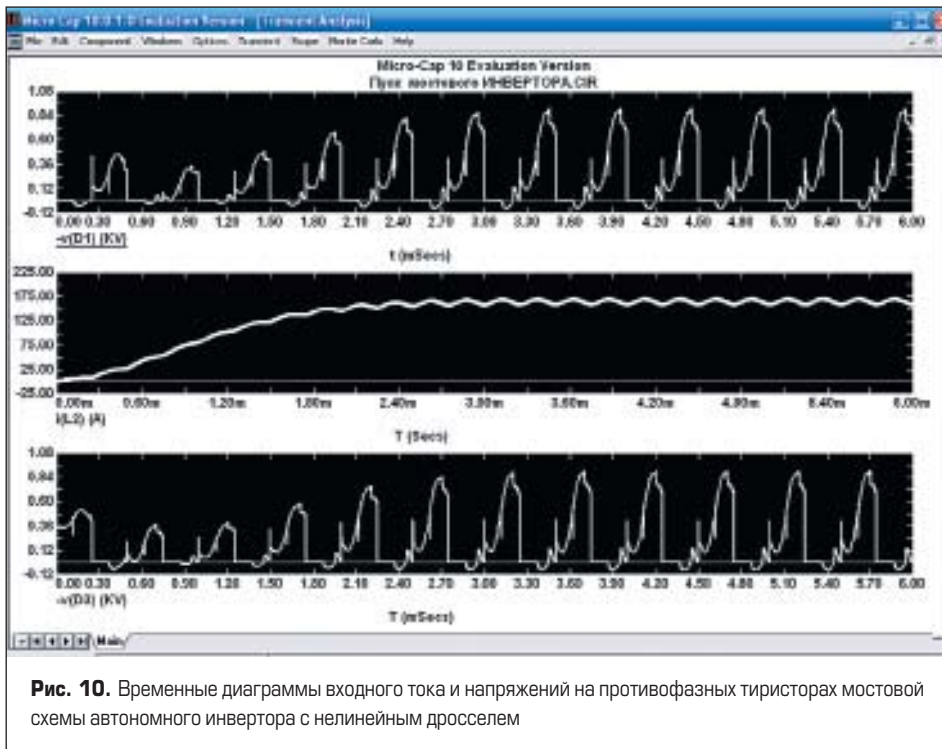


Рис. 10. Временные диаграммы входного тока и напряжений на противофазных тиристорах мостовой схемы автономного инвертора с нелинейным дросселем

Анализ кривых напряжений и токов на каждом интервале коммутации не производился, потому что для оценки работы автономного инвертора достаточно наличия колебательного процесса в нагрузке инвертора, иначе регистрируется срыв инвертирования, причину, но не последствия которого мы и исследовали.

В заключение отметим, что оценочные суждения в данной статье широко использовались потому, что для расчетов электромагнитных процессов в силовых схемах автономных инверторов достаточна точность в 10–15%, и получение более точного результата не имеет практической ценности.

Заключение

- Схематехническим моделированием автономного инвертора подтверждено, что наибольшая вероятность отказов имеет место при его пуске. На основании проведенных исследований показана необходимость выбора параметров элементов инвертора не только с точки зрения обе-

спечения номинальных режимов, но и с учетом процессов пуска.

- Проведенные исследования показывают, что эффективным средством повышения надежности пуска рассмотренного автономного инвертора является предварительный заряд разделительного конденсатора до начальной величины, равной напряжению источника питания. При этом основной причиной неуспешного пуска автономного инвертора является уменьшение времени, предоставляемого схемой на восстановление управляемости тиристорам.
- Увеличение емкости разделительного конденсатора в автономном инверторе благоприятно с точки зрения обеспечения надежности пуска, однако это не эффективный, а затратный путь достижения указанной цели.
- Применение нелинейного дросселя в коммутационной цепи высокочастотного автономного инвертора способствует самоликвидации аварийного процесса при его пуске.

1. Зинин Ю., Терешкин В., Карамов А. Переходные процессы пуска тиристорного мостового инвертора с удвоением частоты // Силовая электроника. 2011. № 5.
2. Разевиг В. Д. Система схематехнического моделирования Micro-Cap V. М.: СОЛОН. 1997.
3. Зинин Ю. М., Терешкин В. М. Особенности моделирования переходных процессов тиристорных преобразователей частоты в системе Micro-Cap. Труды международной конференции «Теоретическая информатика – 2000: от теории к практике». Уфа: УГАТУ. 2000.
4. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 3.
5. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
6. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схематехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
7. Зинин Ю. М., Марон В. М., Иванов А. В. Методика расчета резонансных инверторов для электротермии // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. М. 1983. Вып. 10 (156).
8. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
9. Пат. № 2215361 (РФ) Мостовой инвертор / Ю. М. Зинин, А. В. Ветошкин, Ю. П. Ройзман. 2003.
10. Зинин Ю. М. Анализ электромагнитных процессов в мостовом резонансном инверторе с обратными диодами // Электричество. М.: 2009. № 9.
11. Зинин Ю. М., Терешкин В. М. Выявление критерия надежности системы бесконтактной защиты электроэнергетического оборудования // Межвуз. сборник научных трудов «Электротехнические комплексы и системы». Уфа: УГАТУ. 2001.