

# Переходные процессы пуска

## тиристорного мостового инвертора с удвоением частоты

**В статье рассмотрены особенности переходных процессов пуска силовой схемы тиристорного мостового инвертора с обратными диодами и удвоением частоты, широко применяемой для тиристорных преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов токами повышенной частоты. Показано, что в программе Micro-Cap, использующей PSpice-модели компонентов, целесообразно моделировать электромагнитные процессы в инверторе не только для установившегося режима работы, но и для его переходных режимов, начиная с момента пуска. При анализе переходных процессов в схемотехнической модели изменение начальных условий позволяет определить необходимые для надежного пуска инвертора параметры компонентов. Анализ процессов пуска автономного инвертора позволил осмыслить эмпирические выводы, подтвержденные опытом промышленной эксплуатации, и, в частности, повысить надежность пуска мощных высокочастотных установок для индукционного нагрева и плавки металлов.**

**Юрий Зинин, к. т. н.**

umz42@mail.ru

**Владимир Терешкин, к. т. н.**

tvm53@mail.ru

**Альберт Карамов**

ironchap@rambler.ru

### Введение

Экспериментальные, расчетные либо схемотехнические методы исследований электромагнитных процессов в силовой схеме автономного инвертора могут применяться с различными целями. В известной литературе в основном рассматриваются установившиеся режимы работы автономных инверторов с точки зрения оптимизации их параметров при изменении нагрузки. Эта цель обычно достигалась расчетными методами анализа электромагнитных процессов [1–3]. Выполнение условий квазиустановившегося режима означает прекращение переходных процессов пуска. С другой стороны, реализация на практике рассчитанных, даже оптимальных, режимов требует проверки их осуществимости с момента пуска тиристорного инвертора.

Теоретическими методами исследуют, как правило, квазиустановившиеся режимы работы автономных инверторов, поэтому в нашем случае предпочтительно использование схемотехнических методов, при использовании которых автономные инверторы органично выходят на расчетные режимы, начиная с момента подключения источников питания. Такая же картина наблюдается и в реальных инверторах, поэтому применение схемотехнических методов исследований эффективно для выявления условий надежного пуска автономных инверторов.

Схемотехнические методы построения математических моделей автономных инверторов как нелинейных объектов исследования основаны на применении PSpice-моделей компонентов, широко используемых в практике инженерного проектирования. Оболочка (программа), под управлением которой функционирует созданная схемотехническая модель, не имеет большого значения. Авторами давно и с успехом используются очередные версии программы Micro-Cap. В настоящее время на сайте разработчика предлагается демо-версия Micro-Cap 10, которая, несмотря на существенные ограничения в сравнении с профессиональной версией, эффективна для исследований схемотехнических моделей, в составе которых не более 50 компонентов. Этого количества компонентов вполне достаточно для проведения исследований процесса пуска автономных инверторов [4–8].

### Схемотехническая модель для исследования процесса пуска мостового тиристорного инвертора с обратными диодами и удвоением частоты

Тиристорный мостовой инвертор с обратными диодами — распространенная силовая схема автономного инвертора в составе тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ). Укажем, что под ТПЧ

подразумевается функциональное устройство, состоящее из выпрямителя, инвертора и системы управления. Основным назначением рассматриваемого ниже ТПЧ является его применение в установках индукционного нагрева металлов. Преимущества индукционного нагрева, весьма известной и широко распространенной технологии, приводятся в специальной литературе [9–10], начали пропагандироваться в Интернете и даже социальных сетях.

На рис. 1 показан вид схематехнической модели в программе Micro-Cap (файл «Пуск мостового ИНВЕРТОРА.cir») для тиристорного мостового инвертора с удвоением частоты. Это так называемая схема Кацнельсона-Ухова [11], свойства которой исследованы и описаны многими авторами. Однако характер переходных процессов силовой электрической схемы при включении инвертора до ее выхода на установившийся режим изучен недостаточно.

Рассмотрим особенности схематехнического подхода к исследованию процессов пуска, который характеризует переходные режимы с установлением конечной величины напряжения, обычно характеризуемой величиной «раскачки». «Раскачкой» называется превышение напряжения на силовых элементах инвертора над напряжением питания постоянным током. Величина «раскачки» определяется эквивалентным сопротивлением нагрузки инвертора, включенной в выходную цепь колебательного тока повышенной частоты.

Источник питания (ИП) инвертора ( $DC = 500\text{ В}$ ) подключен к тиристорно-диодной мостовой схеме, 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.

Эта схема инвертора получила название мостовой по типу инверторной (преобразовательной) части, которая выполнена на четырех тиристорах и диодах с двумя диагоналями. К одной диагонали моста подключен ИП (источник напряжения с дросселем постоянного тока), а в другой диагонали находятся элементы принудительной коммутации тиристоров [12–14].

ИП автономного инвертора с помощью включения последовательно с источником ЭДС дросселя постоянного тока с величиной индуктивности большей, чем у коммутирующей индуктивности, приданы свойства источника тока. Индуктивность дросселя постоянного тока велика, что определяет значительную электрическую постоянную времени переходных процессов пуска в сравнении с длительностью периода выходной частоты [15].

Нагрузка инвертора (индуктор высокочастотной установки с компенсирующим конденсатором) подключена последовательно по переменному току, относительно диагонали тиристорного моста, через разделительный конденсатор. Укажем, что по переменному току ИП и нагрузка включены параллельно, однако переменная составляющая инверторного моста течет через нагрузку, а пульсации тока в ИП снижаются значительной индуктивностью входного дросселя. Это вторая функция дросселя постоянного тока.

Инерционность электрических колебательных процессов в нагрузке значительно меньше, чем ее постоянная времени для тепловых процессов при индукционном нагреве металлов — наиболее распространенном и эффективном применении этого инвертора. Отметим, что на рассмотрение электрических процессов пуска инвертора инерционность тепловых процессов в его нагрузке не оказывает влияния.

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 сравнительно дешевые низкочастотные тиристоры в мостовой схеме для генерирования токов повышенной частоты. На надежность пуска удвоение частоты инвертора влияния не оказывает.

В цепь источника постоянного тока схематехнической модели (рис. 1) для наглядности нами включен анимированный амперметр, показывающий величину тока в конце расчетного интервала. Перед пуском автономного инвертора его показания нулевые.

К тиристорам и диодам схематехнической модели инвертора подключены резисторы и конденсаторы (R, C) — элементы демпфирования коммутационных перенапряжений.

Внутренние сопротивления катушек индуктивности (R1, R2, R3, R4) показаны в специальном изображении, отличном от резисторов.

Ниже приведем существенные особенности схематехнической модели в графическом виде для программы Micro-Cap 10 Evaluation Version, которая практически повторяет изображение принципиальной электрической схемы инвертора.

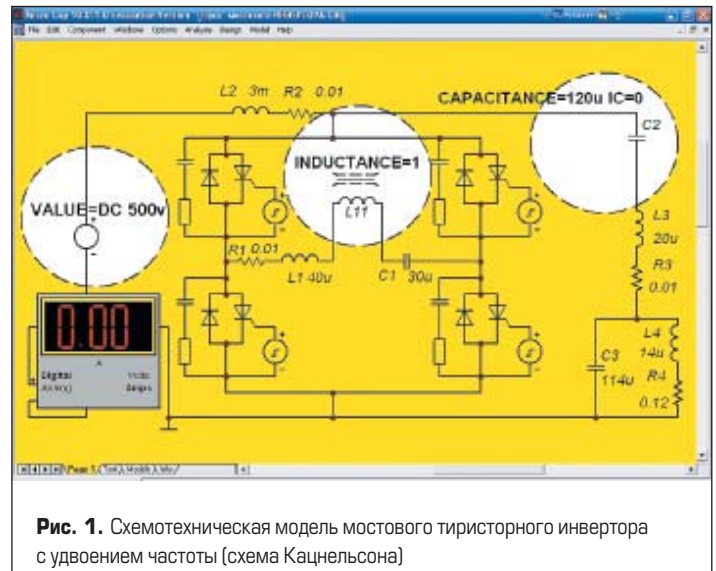


Рис. 1. Схематехническая модель мостового тиристорного инвертора с удвоением частоты (схема Кацнельсона)

На рис. 1 показан нелинейный дроссель насыщения L11 с ферритовым сердечником. Конструкция и назначение этого дросселя изложены в [6], существенного влияния на процессы пуска инвертора этот дроссель не оказывает, поэтому параметры его PSpice-модели не показываем.

PSpice-модели тиристоров и диодов инвертора являются стандартным приложением к программе. В библиотеках элементов присутствуют тиристоры, предлагаемые зарубежными фирмами, публикующими параметры их PSpice-моделей одновременно с выпуском на рынок новых изделий.

На рис. 2 приведены параметры макроса тиристора для схематехнической PSpice-модели тиристорного инвертора. Номинальные параметры тиристора указаны на панели подключаемого макроса из файла SCR:Silicon Controlled Rectifier Macro.

Включение тиристоров схематехнической модели инвертора осуществляется импульсами управления, формируемыми с помощью модели управляемых генераторов импульсов специальной формы: MODEL IMPULSE\_1 и MODEL IMPULSE\_2.

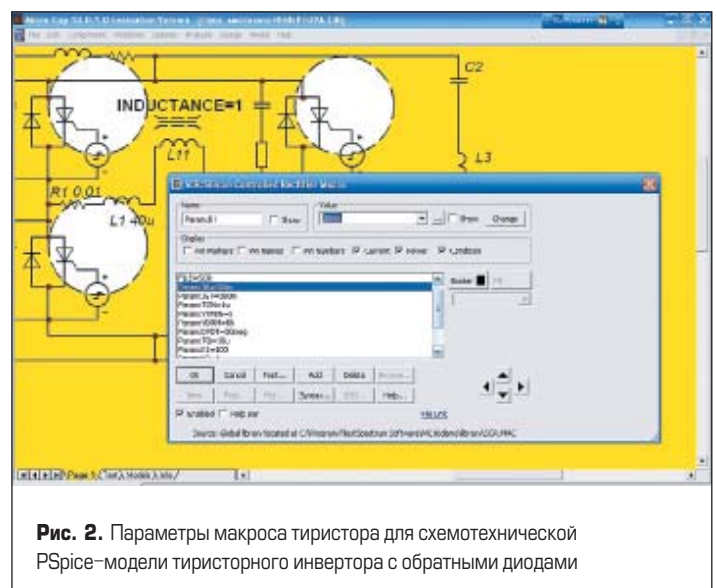
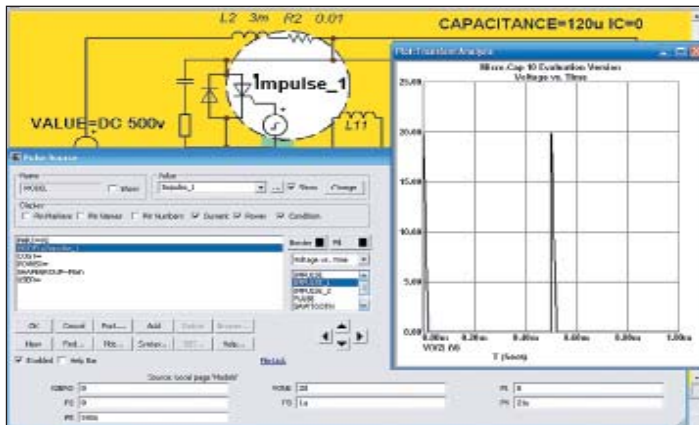


Рис. 2. Параметры макроса тиристора для схематехнической PSpice-модели тиристорного инвертора с обратными диодами

На рис. 3 приведены параметры импульсного источника (Pulse Source) схематехнической PSpice-модели (Impulse\_1) и его временная диаграмма (Voltage vs. Time).

Параметры PSpice-моделей источников импульсных сигналов управления тиристорами автономного инвертора следующие:  
**.MODEL IMPULSE\_1 PUL (VONE=20 P1=0 P2=0 P3=1u P4=21u P5=500u)**  
**.MODEL IMPULSE\_2 PUL (VONE=20 P1=250u P2=250u P3=251u P4=271u P5=500u).**

Источники импульсных сигналов, имитирующие систему управления ТПЧ, симметричны во времени и управляют включением противофазных тиристоров мостовой схемы инвертора. Эти модели позволяют изменять длительности фронтов, длительность импульсов, их амплитуду и частоту повторения. Временная диаграмма импульса управления приведена на рис. 3 справа, она повторяет реальную форму выходного сигнала системы управления инвертором.

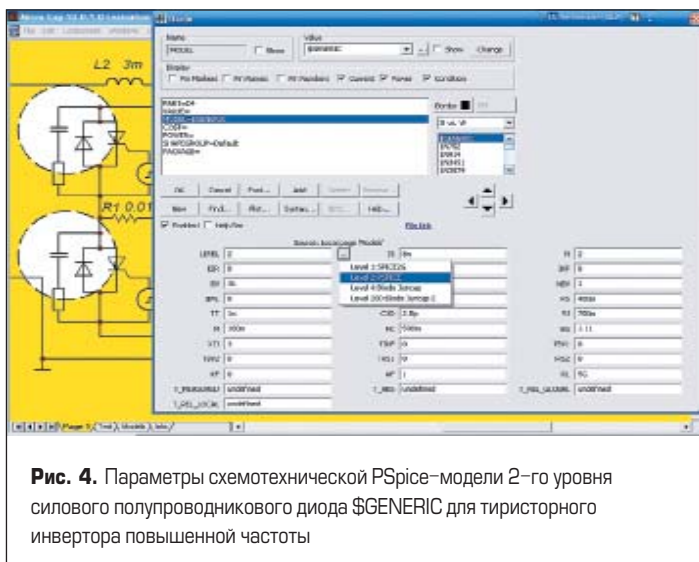


**Рис. 3.** Параметры импульсного источника (Pulse Source) схематехнической PSpice-модели (Impulse\_1) и временная диаграмма (Voltage vs. Time) для управления тиристорами инвертора повышенной частоты

На рис. 4 приведены параметры схематехнической модели второго уровня для силового полупроводникового диода, названной \$GENERIC. Этот уровень соответствует PSpice-описанию модели диода с величиной рабочего напряжения, соответствующего 10 классу, то есть BV = 1000.

Параметры PSpice-модели диода автономного инвертора следующие:  
**\*\*\* From file C:\Program Files\Spectrum Software\MCI0demolibrary\UTILITY.LBR**  
**\*\*\* Generic Diode**  
**.MODEL \$GENERICD (LEVEL=2 IS=8n N=2 BV=1000 RS=400m TT=1n CJO=2.5p VJ=700m M=100m RL=5G).**

Макреты тиристоров и модели диодов инвертора стандартные. Они учитывают классификационные параметры тиристоров и диодов по току, напряжению, времени восстановления управляемости и др.



**Рис. 4.** Параметры схематехнической PSpice-модели 2-го уровня силового полупроводникового диода \$GENERIC для тиристорного инвертора повышенной частоты

Параллельно встречно включенным тиристоры и диоду мостовой схемы инвертора на его схематехнической модели, показанной на рис. 4, присутствуют демпфирующие цепочки, ограничивающие перенапряжения, состоящие из конденсатора и резистора. Они эффективно уменьшают амплитуду всплесков перенапряжений, возникающих на индуктивностях инвертора при обрыве обратного тока встречных диодов, и уменьшают крутизну нарастания передних фронтов прямого напряжения на тиристорах.

**Схематехнический анализ электромагнитных процессов в тиристорном мостовом инверторе**

Первым этапом анализа схематехнической модели, приведенной на рис. 1, является определение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) нагрузочного колебательного контура. Частотный анализ схематехнической модели инвертора определяет номинальную резонансную частоту нагрузочного контура. При схематехническом моделировании процессов пуска устанавливается рабочая частота инвертора, соответствующая резонансной частоте нагрузки.

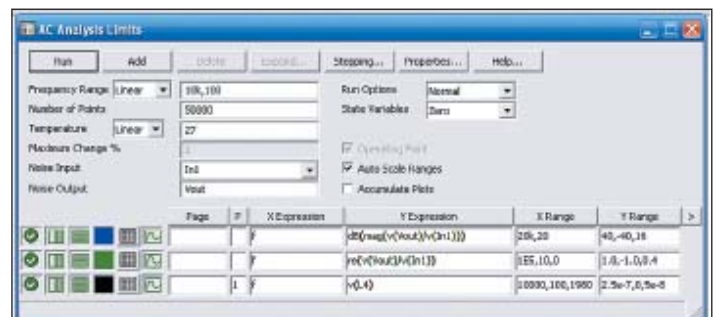
На рис. 5 показана панель задания параметров АЧХ частотного анализа для напряжения на индуктивности колебательного контура нагрузки (AC Analysis Limits) в заданных пределах 0,1–10 кГц.

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

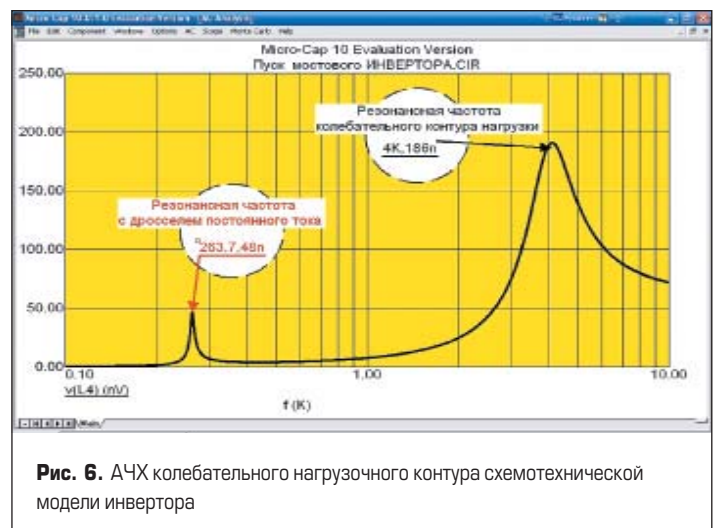
Проводимые с помощью программы Micro-CAP этапы схематехнического моделирования переходных процессов пуска — в частности, частотный (AC) и Transient-анализ переходных процессов — представляются ниже полученными графиками.

На рис. 6 приведена АЧХ колебательного нагрузочного контура схематехнической модели мостового инвертора с учетом влияния параметров всех элементов, в том числе дросселя постоянного тока.

Нижний (по частоте) резонанс соответствует частоте колебаний конденсатора фильтра и индуктивности дросселя фильтра. Верхний резонанс соответствует рабочей частоте колебательной цепи инвертора,



**Рис. 5.** Панель задания параметров АЧХ для анализа процессов пуска автономного инвертора



**Рис. 6.** АЧХ колебательного нагрузочного контура схематехнической модели инвертора

равной 4 кГц. Следовательно, учитывая удвоение рабочей частоты, необходимо установить частоту включения тиристорных схемотехнической модели 2 кГц. С этой частотой в схемотехнической модели симулируется включение макросов тиристорных инверторного моста. После интервала проводимости синфазных тиристорных ток встречного направления проводят обратные диоды, в этом интервале тиристор восстанавливает управляющие свойства и таким образом осуществляется «мягкая» колебательная коммутация тиристорных инвертора.

Интервал времени восстановления никогда не должен быть меньше (с определенным коэффициентом запаса) паспортной величины времени восстановления управляемости, предоставляемого тиристором, это основное условие успешного пуска и надежной работы тиристорного инвертора.

На рис. 7 показана панель задания параметров для анализа переходных процессов пуска автономного инвертора.

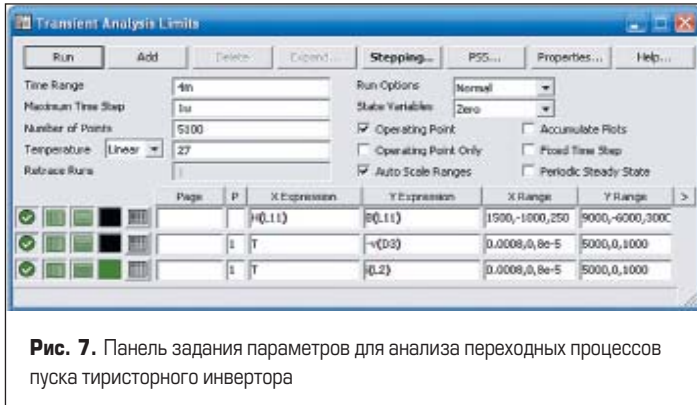


Рис. 7. Панель задания параметров для анализа переходных процессов пуска тиристорного инвертора

На рис. 8 приведены временные диаграммы входного тока и тока в нагрузке мостового инвертора при пуске с начальным нулевым напряжением (IC = 0) на разделительном конденсаторе CAPACITANCE емкостью 120 мкФ.

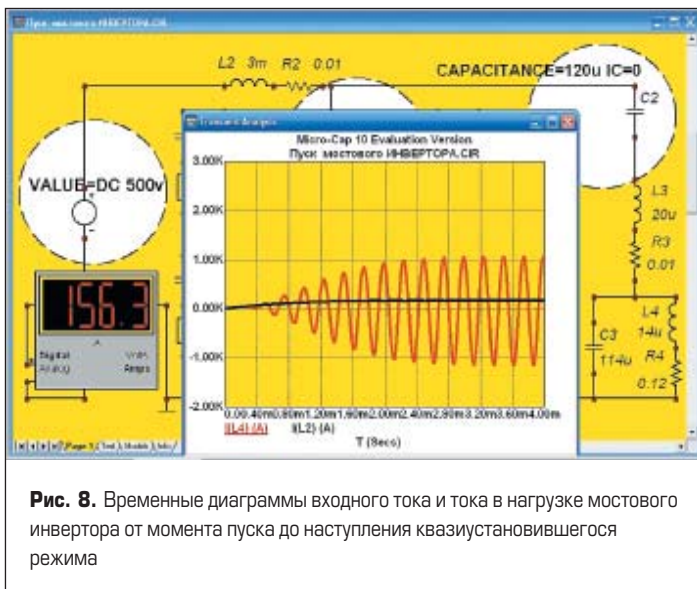


Рис. 8. Временные диаграммы входного тока и тока в нагрузке мостового инвертора от момента пуска до наступления квазиустановившегося режима

Обе диаграммы, приведенные в одном масштабе, иллюстрируют пуск инвертора при нулевых условиях на разделительном конденсаторе, поэтому входной ток монотонно увеличивается до величины 156,3 А. Амплитудная величина тока в нагрузке инвертора составляет 1000 А, а переходной процесс пуска длится около 10 периодов тока высокой частоты.

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

На рис. 9 приведены результаты анализа переходного процесса для напряжения на разделительном конденсаторе автономного инвертора

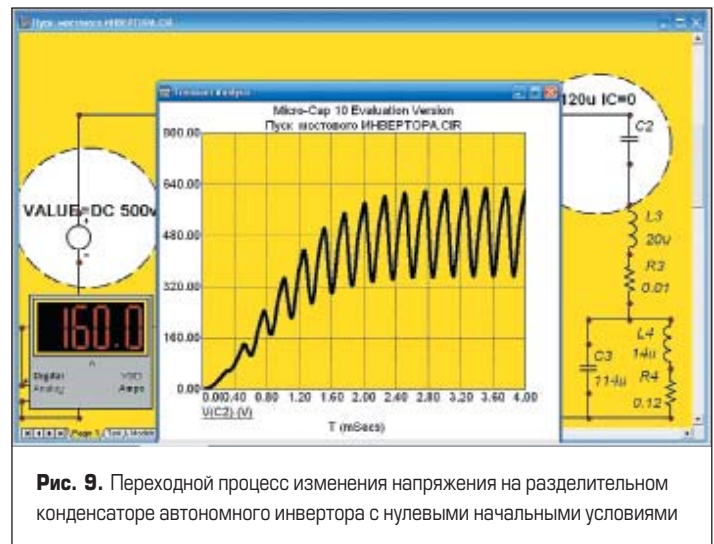


Рис. 9. Переходной процесс изменения напряжения на разделительном конденсаторе автономного инвертора с нулевыми начальными условиями

с нулевыми начальными условиями. Пульсирующая кривая напряжения монотонно возрастает до установившейся величины среднего значения напряжения источника питания инвертора (на рис. — VALUE = DC 500v), при этом величина входного тока, согласно показанию амперметра схемотехнической модели, равна 160 А.

Так как подача импульсов управления на тиристоры инвертора в реальном ТПЧ осуществляется с некоторой задержкой после включения питания инвертора, то разделительный конденсатор заряжается от источника питания, и пуск инвертора происходит при ненулевых условиях заряда на разделительном конденсаторе.

На рис. 10 приведена временная диаграмма изменения напряжения на предварительно заряженном разделительном конденсаторе инвертора в процессе пуска. Пульсирующее напряжение от начальной величины IC = 500 В в процессе пуска уменьшается и затем возрастает до среднего установившегося значения DC 500 В, как и на предыдущей диаграмме. Входной ток инвертора также практически равен 160 А, то есть за время переходных процессов, независимо от начальных условий пуска, в модели достигается стабильное квазистационарное состояние, характеризующее величину раскочки напряжения в инверторе.

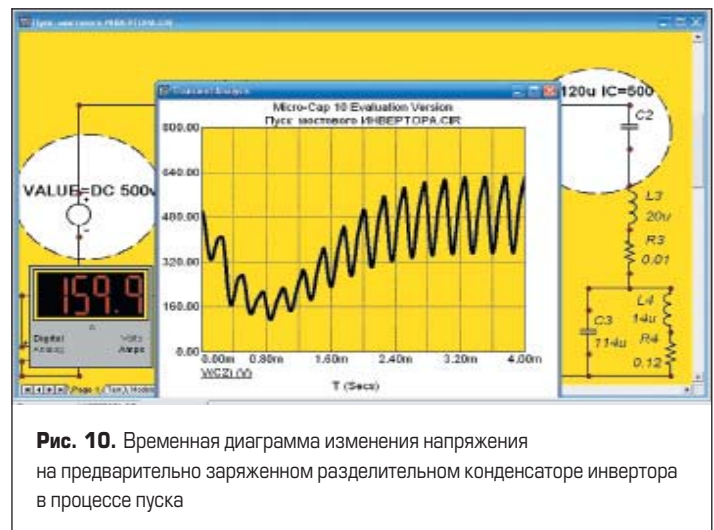


Рис. 10. Временная диаграмма изменения напряжения на предварительно заряженном разделительном конденсаторе инвертора в процессе пуска

Рис. 9 и 10 показывают, что после окончания переходных процессов в инверторе устанавливается одинаковая амплитуда пульсаций напряжения на разделительном конденсаторе со средним значением, равным таковому на источнике питания автономного инвертора (DC 500 В).

### Анализ переходных процессов при пуске мостового инвертора

Следующим этапом исследования схемотехнической модели является анализ переходных процессов пуска, для этого определяем входной

и выходной токи автономного инвертора на рассчитываемом интервале времени схемотехнической модели.

На рис. 11 приведены временные диаграммы входного тока и тока нагрузки автономного инвертора при срыве инвертирования тиристорного инвертора в процессе пуска. Срыв инвертирования приводит к значительному возрастанию входного тока инвертора, скорость нарастания которого ограничена индуктивностью дросселя постоянного тока. Амперметр показывает 615 А, это предельная величина, при которой не повреждаются тиристоры инвертора при срыве инвертирования. В реальности для этого случая затем сработает быстродействующая защита, отключающая источник питания от инвертора [16, 17].

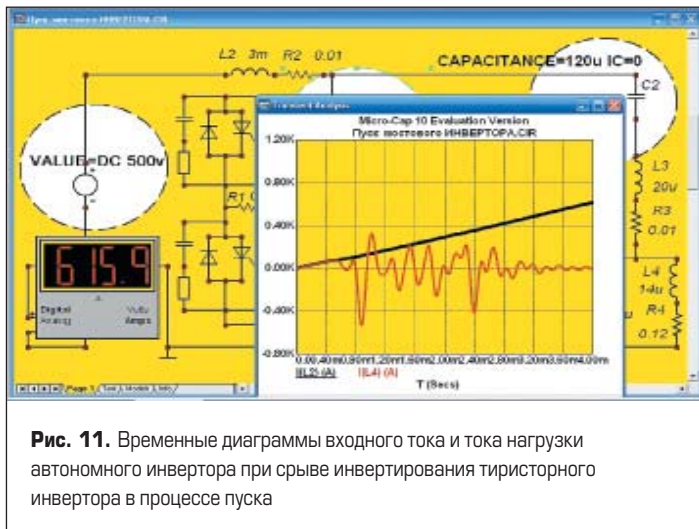


Рис. 11. Временные диаграммы входного тока и тока нагрузки автономного инвертора при срыве инвертирования тиристорного инвертора в процессе пуска

Проведенные исследования показывают, что простым и эффективным средством повышения надежности пуска рассмотренного автономного инвертора является предварительный заряд разделительного конденсатора до начальной величины, равной напряжению источника питания. При этом время восстановления управляемости, предоставляемое тиристорам, не должно уменьшаться ниже предельной паспортной величины.

На рис. 12 приведены графики напряжения на тиристоре при пуске, показывающие изменение времени восстановления, предоставляемого тиристорам автономного инвертора при увеличении емкости разделительного конденсатора. Опция **Stepping** позволила дискретно изменять величину конденсатора и затем вывести рассчитанные графики на одну диаграмму.

Графики показывают эффект от увеличения емкости разделительного конденсатора. На основании проведенных исследований осуществляется выбор параметров элементов инвертора не только с точки зрения обеспечения номинальных режимов, но и с учетом процессов его пуска.

Таким образом, схемотехническим моделированием автономного инвертора показано, что наибольшая вероятность отказов приходится на его пуск. При запуске мощных высокочастотных установок для индукцион-

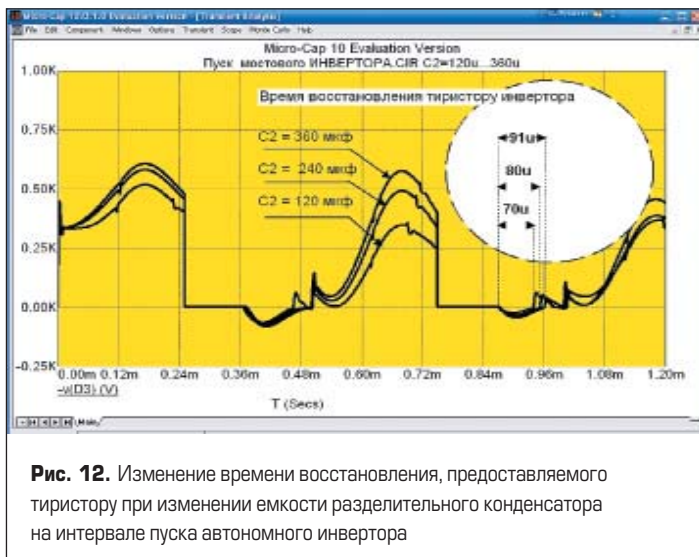


Рис. 12. Изменение времени восстановления, предоставляемого тиристорам при изменении емкости разделительного конденсатора на интервале пуска автономного инвертора

ного нагрева и плавки металлов происходит значительное повышение температуры силовых компонентов, величина которой влияет на надежность работы силовых полупроводниковых приборов. Температура компонентов схемотехнической модели может учитываться при моделировании, однако в данном случае это нецелесообразно, так как тепловая постоянная силовых полупроводниковых приборов значительно больше длительности процесса пуска.

**Заключение**

Анализ электромагнитных процессов пуска автономного инвертора эффективно осуществляется схемотехническим моделированием. Использование схемотехнических PSpice-моделей автономных инверторов обеспечивает существенное сокращение времени проведения исследований переходных процессов, в особенности для процессов пуска.

Эффективным приемом повышения надежности пуска мостового инвертора с удвоением частоты является предварительный заряд разделительного конденсатора, включенного последовательно с нагрузкой, до величины, близкой к напряжению источника питания. Заряд можно осуществить непосредственно от источника питания, применив задержку подачи импульсов управления на включение тиристоров относительно включения питания инвертора.

**Литература**

1. Аитов И. Л. Силовые электронные устройства. Уфа: УГАТУ. 2009.
2. Зинин Ю. М., Марон В. М., Иванов А. В. Методика расчета резонансных инверторов для электротермии // Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника. 1983. Вып. 10 (156).
3. Беркович Е. И., Ивенский Г. В., Иоффе Ю. С., Матчак А. Т., Моргун В. В. Тиристорные преобразователи высокой частоты. Л.: Энергия. 1973.
4. <http://www.spectrum-soft.com/demodownnew.shtm>.
5. Разевит В. Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap V. М.: СОЛОН. 1997.
6. Валиуллина З., Егоров А., Есаулов А., Зинин Ю. Исследование средствами схемотехнического моделирования нелинейного дросселя переменного тока в составе тиристорного высокочастотного инвертора // Силовая электроника. 2008. № 2.
7. Шапиро С. В., Жидков В. В. Моделирование трехфазного источника питания озонатора // Межвуз. сб. научных трудов «Электротехнические комплексы и системы». Уфа: УГАТУ. 2009.
8. 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.
9. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
10. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
11. А. с. № 235177 (СССР) Независимый инвертор / С. М. Кацнельсон, В. С. Ухов // Бюл. 1969. № 5.
12. Пат. № 2215361 (РФ) Мостовой инвертор / Ю. М. Зинин, А. В. Ветошкин, Ю. П. Ройzman // Бюл. 2003.
13. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 3.
14. Зинин Ю. М. Анализ электромагнитных процессов в мостовом резонансном инверторе с обратными диодами // Электричество. 2009. № 9.
15. Валиуллина З., Есаулов А., Егоров А., Зинин Ю. Особенности проектирования силовых выпрямителей в качестве источников постоянного тока для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 3.
16. Зинин Ю. М., Терешкин В. М. Выявление критерия надежности системы бесконтактной защиты электроэнергетического оборудования // Межвуз. сб. научных трудов «Электротехнические комплексы и системы». Уфа, УГАТУ. 2001.
17. [www.power-e.ru](http://www.power-e.ru)