

Схемотехническая модель ИНДУКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

с тиристорным преобразователем ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Приведено описание схемотехнической модели индукционного комплекса с тиристорным преобразователем частоты (ТПЧ) и источником электропитания. Нагрузка тиристорного инвертора представлена колебательным контуром с индуктором для порционной плавки металлов в плавильной печи типа ИСТ-0,16. Схемотехнические модели, в рабочем окне программы моделирования Micro-CAP 9 построены на основе PSpice-описаний компонентов. Параметры простых компонентов и PSpice-моделей редактируются на вызываемых панелях. Проведен частотный анализ схемотехнической модели, анализ переходных процессов, описаны результаты исследования электромагнитных процессов в инверторе по действующим напряжениям, токам инвертора и гармоническому составу тока индуктора. Результаты исследований позволяют произвести реновацию рабочих режимов ТПЧ при плавке черных и цветных металлов в индукционной электропечи.

Юрий Зинин

umz42@mail.ru

Введение

В настоящее время ТПЧ являются основным источником электропитания промышленных установок для индукционного нагрева металлов. Сейчас производители и потребители электротермического оборудования в основном определились с типовыми конструкциями ТПЧ, их схемным решением, комплектацией вспомогательным оборудованием, рациональными областями применения, режимами работы и другими техническими характеристиками [1–3]. В конкурентных условиях определились рациональные технические решения, соответствующие современному уровню развития высокочастотных изделий силовой электроники — ТПЧ для индукционного нагрева металлов. Их обычно называют высокочастотными, в отличие от широко распространенных ТПЧ для электропривода.

Для мощных высокочастотных ТПЧ существенной особенностью является, во-первых, применение системы водяного охлаждения полупроводниковых и ферромагнитных элементов, а также для охлаждения силовых конденсаторов и индуктивностей. Во-вторых, необходимо уменьшение уровня электромагнитных помех, обеспечение электромагнитной совместимости с другим промышленным оборудованием. До настоящего времени, несмотря на значительное количество публикаций в отношении различных схем ТПЧ, специализированных для индукционного назначения, нет единого мнения относительно их преимуществ. Это можно объяснить историческими и субъективными причинами, а также невозможностью применения

единого комплексного показателя качества, выработка которого препятствуют те же названные причины субъективного характера. Из этой ситуации есть только один рациональный выход — использование таких методов проектирования, которые исключают субъективный подход к оценке его результатов. К таким методам относится и схемотехническое моделирование изделий силовой электроники, выполняемое без существенных упрощений электрической схемы, — основной способ современного представления силового электротехнического устройства для инженера-исследователя [4–11].

Описание схемотехнической модели тиристорного преобразователя частоты

Рассмотрим схемотехническую модель ТПЧ, выполненную в программе Micro-CAP 9 — последней версии этого симулятора. Заметим, что при исследованиях ТПЧ целесообразно совместно моделировать все его функциональные узлы: сеть, выпрямитель, инвертор, колебательную нагрузку с индуктором. Это объясняется тем, что потребляемая ТПЧ активная мощность имеет одинаковый порядок с установленной мощностью источника питания — трехфазной сетью и выпрямителя. В тиристорном инверторе мы, в необходимых случаях, моделируем последовательное включение необходимого числа тиристорных с демпфирующими элементами и последовательным нелинейным дросселем насыщения. Такая композиция позволяет в максимальной степени приблизиться к ре-

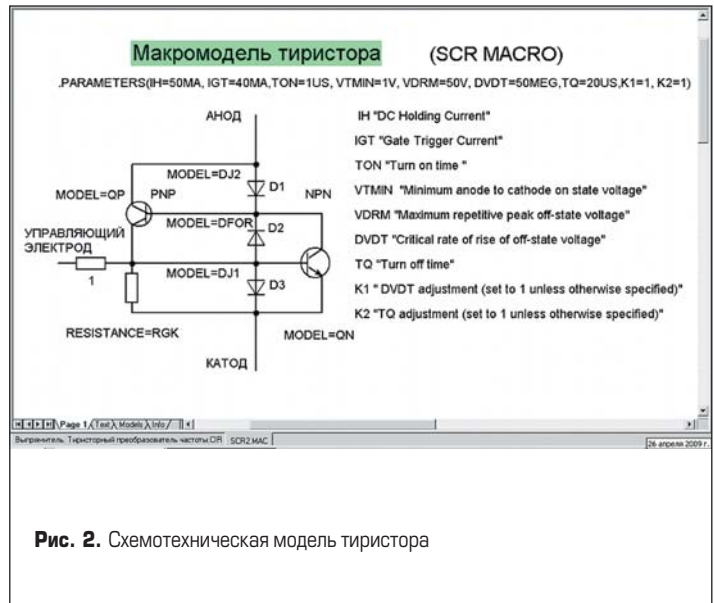
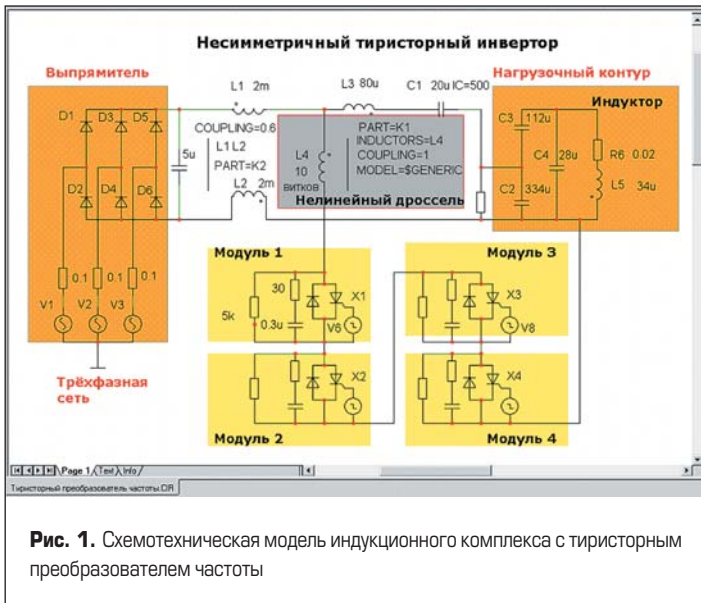


Рис. 1. Схематехническая модель индукционного комплекса с тиристорным преобразователем частоты

Рис. 2. Схематехническая модель тиристора

альному объекту (ТПЧ). Раздельное моделирование перечисленных функциональных узлов ТПЧ целесообразно на этапе их разработки, но не дает цельного представления об объекте исследований.

На рис. 1 изображена используемая нами схематехническая модель тиристорного преобразователя частоты. Схематехническая модель выполнена в 9 Demo Version программы Micro-CAP, в которой условное графическое изображение компонентов схемы приближено к отечествен-

ному стандарту, поэтому принципиальные электрические схемы функциональных узлов тиристорного преобразователя частоты: трехфазной сети, выпрямителя, несимметричного тиристорного инвертора, с тиристорно-диодными модулями, демпфирующими элементами, нагрузочным контуром — соответствуют их привычному графическому изображению с отображением существенных особенностей.

В целом при схематехническом моделировании файла C:\MC9DEMO\Тиристорный пре-

образователь частоты.CIR использованы компоненты, связанные суммарным количеством 26 аналоговых узлов (Analog Nodes = 26) из доступной библиотеки C:\MC9DEMO\library\SCR.MAC, указанные в таблице 1. Это количество является предельным для демо-версии программы Micro-CAP. В таблице 1 указаны компоненты схематехнической модели, использованные при моделировании ТПЧ.

Оригинальными для схематехнической модели ТПЧ являются следующие PSpice-модели: синусоидальные источники трех фаз — V1, V2 и V3, модель силового диода выпрямителя и инвертора, макрос тиристора, а также модель сердечника нелинейного дросселя. Цветные прямоугольники на рис. 1 выделяют функциональные узлы и дополнительно выполняют функции масок компонентов схемы, защищенных от непреднамеренного изменения параметров.

Макрос тиристора

Тиристоры в схематехнической модели ТПЧ представлены макросом, который использует схематехническую модель, подобную ТПЧ, и содержит описание компонентов, представленных на рис. 2.

В описании тиристора X1-SCR — кремниевого управляемого вентиля (Part 'X1' — тиристорный преобразователь частоты, Macro 'SCR' можно найти в C:\MC9DEMO\library\SCR.MAC' на странице 'Page 1'), согласно схеме замещения рис. 2, приведены следующие параметры SCR: IH, IGT, TON, VTMIN, VDRM, DVDT, TQ, K1, K2. В таблице 2 указаны названные параметры тиристора.

Панель установки параметров макромодели силового тиристора X4, выполненной средствами Micro-CAP, показана на рис. 3. Панель параметров модели тиристора вызывается для ее редактирования. На панели установлены параметры, соответствующие силовому тиристорному с рабочим напряжением 1000 В. В примечаниях к макросу тиристора указана авторская коррекция параметров элементов схематехнической модели — резисторов и транзисторов.

Таблица 1. Компоненты схематехнической модели

Наименование компонентов	Количество	Примечание
Resistor (резистор)	21	R различной величины
Inductor (индуктивность)	5	L различной величины
K (коэффициент взаимной индуктивности)	2	K = 1
Capacitor (конденсатор)	9	C различной величины
Diode (диод)	22	10 силовых диодов + 12 диодов в макросах тириستоров
NPN (транзистор обратной проводимости)	4	PSpice-модель в макросах SCR
PNP (транзистор прямой проводимости)	4	PSpice-модель в макросах SCR
Pulse source (источник импульсных сигналов)	4	PSpice-модель
Sine source (синусоидальные источники)	3	Согласно PSpice-модели с различными параметрами
Macro (макрос тиристоров)	4	SCR macro

Таблица 2. Параметры тиристора

Параметр	Наименование	Величина
IH	DC Holding Current — ток удержания, мА*	50
IGT	Gate Trigger Current — ток включения по управляющему электроду, мА	40
TON	Turn on time — время включения, мкс	1
VTMIN	Minimum anode to cathode on state voltage — минимальное напряжение в проводящем состоянии, В	1
VDRM	Maximum repetitive peak off-state voltage — напряжение пробоя в прямом включении, В	50
DVDT	Critical rate of rise of off-state voltage — критическая величина возрастания прямого напряжения dv/dt, В/мс	50
TQ	Turn of time — время восстановления управляемости, мкс	20
K1	DVDT adjustment (set to 1 unless otherwise specified) — безразмерный коэффициент	1
K2	TQ adjustment (set to 1 unless otherwise specified) — безразмерный коэффициент	1

Примечание. * Идентификация параметра происходит по 1 букве, вторая указывается для удобства пользователя.

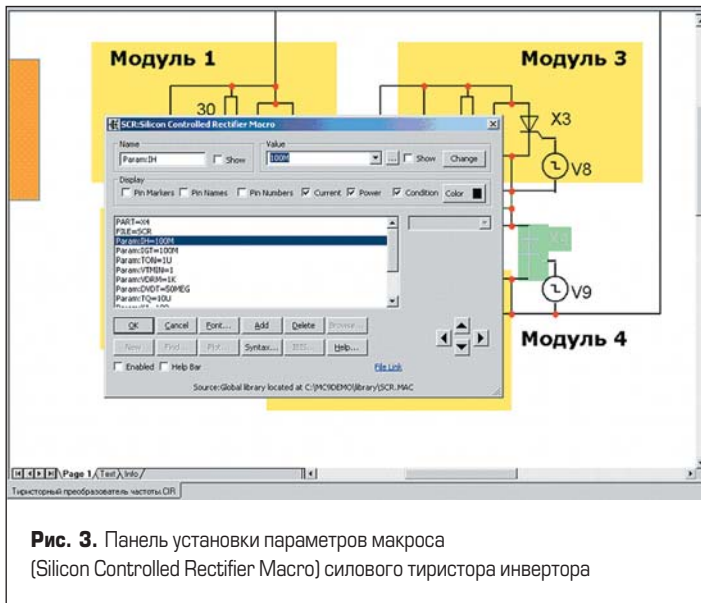


Рис. 3. Панель установки параметров макроса (Silicon Controlled Rectifier Macro) силового тиристора инвертора

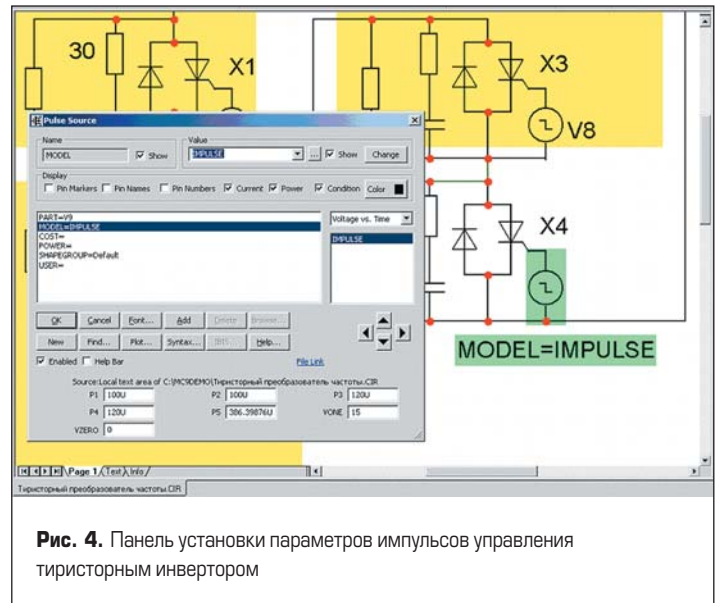


Рис. 4. Панель установки параметров импульсов управления тиристорным инвертором

Формирование импульсов управления тиристорами ТПЧ

На рис. 4 показана панель установки параметров модели импульсного источника, имитирующего действие системы управления автономным инвертором — .MODEL IMPULSE PUL (VONE=15; P1=100U; P2=100U; P3=120U; P4=120U; P5=386,39876U). Импульсные последовательности формируются для каждого тиристора. В этом случае нет необходимости в гальваническом разделении управляющих сигналов для тиристоров, управляющие электроды которых находятся под различным потенциалом.

Импульсы управления тиристорами рассматриваемого однотактного инвертора эквидистантны, то есть распределены равномерно по оси времени импульсным генератором MODEL IMPULSE (рис. 5). Неэквидистантность управляющих импульсов может негативно проявляться при многоканальных системах формирования импульсов управления тиристорами в двухтактных или мостовых схема инверторов. Временные диаграммы импульсов управления определяют частоту (период) включения

тириستоров автономного инвертора, которая определяется принципом работы автономного инвертора и схемой замещения его контура нагрузки. На этапе исследования характеристик тиристорного инвертора его нагрузку можно представить омическим сопротивлением. Такое представление нагрузки недостаточно при исследованиях тиристорного инвертора в составе ТПЧ.

Индуктор плавильной печи — эквивалент нагрузки ТПЧ — входит в состав резонансного контура нагрузки, который обладает активным и реактивным сопротивлением. Чем меньше активное сопротивление индуктора (и связанного с ним эквивалентного вносимого сопротивления металла в индукторе плавильной печи), тем больше эквивалентное резонансное сопротивление колебательного контура нагрузки. Резонансная частота колебательного нагрузочного контура будет определена нами далее из результатов частотного анализа созданной схематехнической модели ТПЧ.

На рис. 5 справа на фрагменте схематехнической модели ТПЧ показан источник импульсных сигналов и колебательный резонансный контур нагрузки с индуктором, эквивалентные параметры которого соответствуют индуктору плавильной печи типа ИСТ-0.16. При эквивалентном замещении индукционной печи с металлом, катушкой индуктивности с металлическим сердечником, имеется возможность в ее параметрах указывать число витков, что часто используют разработчики индукционных электропечей.

нансный контур нагрузки с индуктором, эквивалентные параметры которого соответствуют индуктору плавильной печи типа ИСТ-0.16. При эквивалентном замещении индукционной печи с металлом, катушкой индуктивности с металлическим сердечником, имеется возможность в ее параметрах указывать число витков, что часто используют разработчики индукционных электропечей.

Моделирование 3-фазной сети

На рис. 1 показаны 3 источника синусоидальных ЭДС — V1, V2 и V3, имитирующих промышленную сеть трехфазного тока 380 В, 50 Гц с заземленной нейтралью. Источники синусоидального напряжения представлены тремя PSpice-моделями: *** 0 Phase Leg.MODEL 3PHASEA SIN (F = 50; A = 310; RS = 0); *** 120 Phase Leg.MODEL 3PHASEB SIN (F = 50; A = 310; PH = 2,0944; RS = 0); *** 240 Phase Leg.MODEL 3PHASEC SIN (F = 50; A = 310; PH = 4,1888; RS = 0).

Так как в моделях наших синусоидальных источников внутреннее сопротивление равно нулю, а источник питания ТПЧ значительной мощности нельзя считать источником

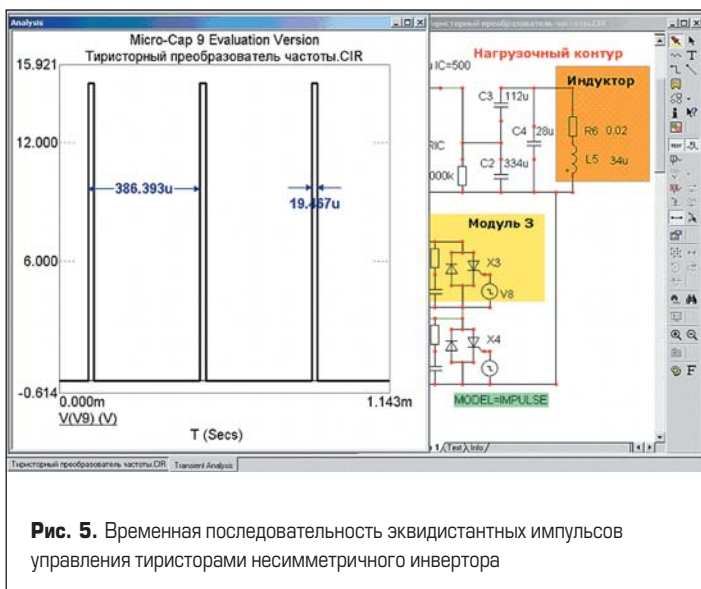


Рис. 5. Временная последовательность эквидистантных импульсов управления тиристорами несимметричного инвертора

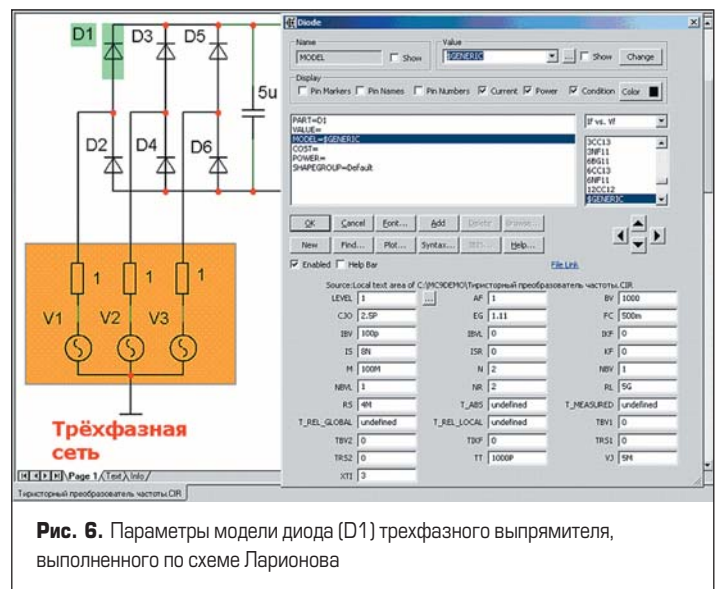


Рис. 6. Параметры модели диода (D1) трехфазного выпрямителя, выполненного по схеме Ларионова

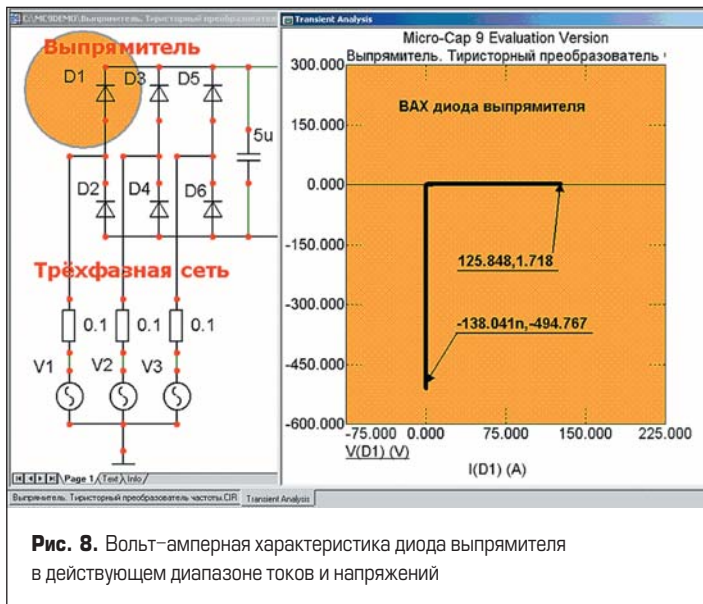
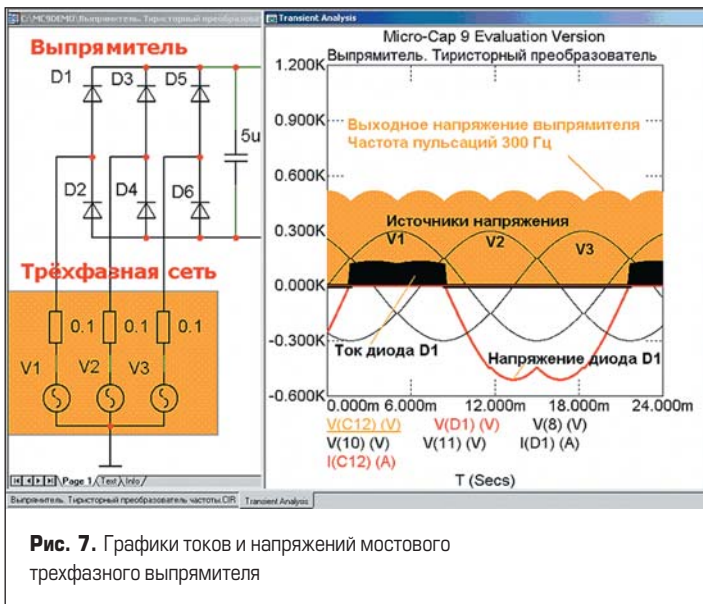


Рис. 7. Графики токов и напряжений мостового трехфазного выпрямителя

Рис. 8. Вольт-амперная характеристика диода выпрямителя в действующем диапазоне токов и напряжений

неограниченной мощности, последовательно фазам питания включаем 3 дополнительных резистора $R = 0,1-1 \text{ Ом}$. Эти резисторы изменяют длительность коммутации неуправляемых диодов мостового трехфазного выпрямителя, следовательно, они определяют, вместе с прямым сопротивлением диодов, внешнюю (нагрузочную) характеристику выпрямителя.

Модель диода

На рис. 6 приведены параметры модели диода D1, одного из анодной группы мостового выпрямителя. Параметры модели диода .MODEL \$GENERIC D (IS = 8N; N = 2; BV = 5000; RS = 4M; TT = 1000P; CJO = 2,5P; VJ = 5M; M = 100M; RL = 5G) указываются и редактируются на его панели, вызываемой при наведении курсора. Справа на рис. 6 показано меню рабочего окна с кнопками доступных и включенных пользовательских функций программы Micro-CAP 9. Сохраненная в файле модель диода с новым именем GENERIC имеет необходимый параметр обратного напряжения $BV = 1000 \text{ В}$. Остальные диоды выпрямителя имеют аналогичные параметры.

Емкость на выходе фильтра, величиной 5 мкФ, не предназначена для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Действительная амплитуда пульсаций и их частота (300 Гц) определяются из временных диаграмм выходного напряжения. Укажем, что в MicroCAP, как и в других программах схемотехнического моделирования, основной единицей для емкости конденсатора является по умолчанию фарада. Милли- и микрофарады обозначаются как m и u, так как буквы μ нет в латинице.

Анализ переходных процессов в схемотехнической модели выпрямителя

На рис. 7 слева приведена схема выпрямителя, элементы которой описаны выше, справа показаны временные зависимости токов и напряжений для временного диапазона 0–24 мс, несколько превышающего длительность одного периода промышленной частоты — 20 мс.

Кривая выходного напряжения выпрямителя показывает его мгновенные значения с 6-кратной частотой пульсаций относительно частоты 50 Гц. Конденсатор на выходе выпрямителя (5 мкФ) обеспечивает уменьшение коммутационных перенапряжений на выходе выпрямителя.

Диод D1 проводит прямой ток 127 А в течение трети периода, в остальное время к нему приложено обратное напряжение максимальной величиной 520 В. Недостатком схемы является то, что в любой момент времени ток выпрямителя протекает по двум силовым диодам, это увеличивает потери мощности. Другим недостатком мостового трехфазного выпрямителя является высокая вероятность повреждений при коротком замыкании на выходе и пробой по току всех 6 диодов — при повреждении одного. В последнее время быстродействующие предохранители и современная коммутационная аппаратура значительно улучшили защитные характеристики таких выпрямителей.

Предварительно принятая величина эквивалентного сопротивления в фазах синусоидальных источников питания V1, V2 и V3 с точки зрения длительности процессов коммутации неуправляемых диодов оказалась неоправданно большой, поэтому уменьшаем его величину до 0,1 Ом. Получим графики токов и напряжений в схемотехнической модели трехфазного выпрямителя при питании от симметричной трехфазной сети промышленной частоты 50 Гц. Все рассмотренные на рис. 7 графики приведены в единых координатах, с одинаковым масштабом времени.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода D1 (выделенного на рис. 8 слева) показывает предельные величины токов и напряжений на диоде в схеме выпрямителя ТПЧ. Максимальная величина прямого падения напряжения на диоде составляет 1,718 В.

На рис. 9 приведена нагрузочная характеристика трехфазного выпрямителя (мостовая схема Ларионова), обладающая лучшими характеристиками по преобразованию вход-

ного трехфазного напряжения. Отметим, что именно эта характеристика объясняет отсутствие общепринятой величины выходного напряжения для схемы Ларионова, различные авторы указывают его величину в диапазоне 500–520 В. Координаты RMS на рис. 9 — это действующие значения выходного тока и напряжения, в которых показана нагрузочная (внешняя) характеристика. Точка с координатами 508 В соответствует действующему значению выходного напряжения при токе нагрузки 127 А. Сопротивление нагрузки при исследованиях внешней характеристики изменялось в пределах 2–10 Ом (устанавливается функцией Stepping в режиме анализа переходных процессов), что указывается в заголовке файла.

Частотный анализ схемотехнической модели ТПЧ

Частотный анализ проводится с целью определения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) схемы тиристорного инвертора с резонансной нагрузкой, изображенной в виде колебательного контура, в который входит индуктор, эквивалентное сопротивление нагрузки и компенсирующий конденсатор. Этот этап расчета необходим при моделировании, так как в ходе его определяются условия максимальной мощности инвертора и установленная мощность реактивных компонентов. Совпадение выходной частоты тиристорного инвертора с резонансной частотой нагрузочного контура, демпфированного эквивалентным сопротивлением нагрузки, является условием параллельного (токового) резонанса. «Грубая» настройка осуществляется изменением способа подключения компенсирующих конденсаторов. Точная настройка на резонансную частоту производится небольшим изменением частоты управления тиристорами инвертора или изменением эквивалентных параметров нагрузочного контура.

На рис. 10 приведены рассчитанные амплитудно-частотные характеристики нагрузочного контура и коммутирующе-

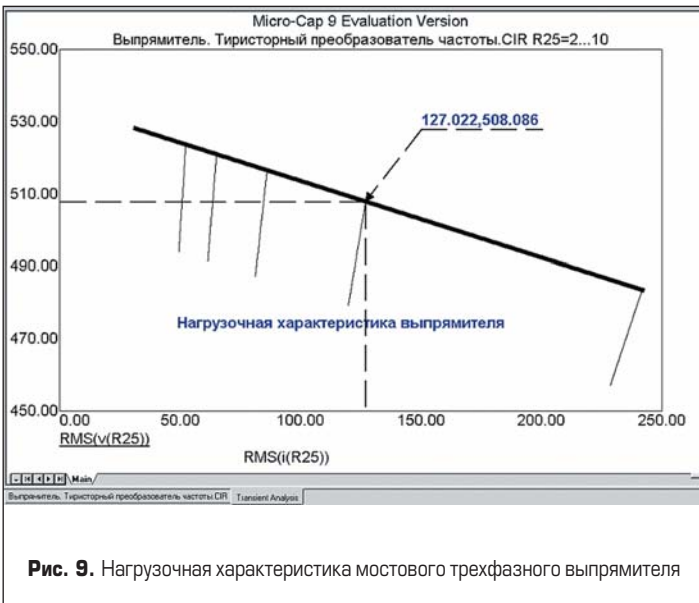


Рис. 9. Нагрузочная характеристика мостового трехфазного выпрямителя

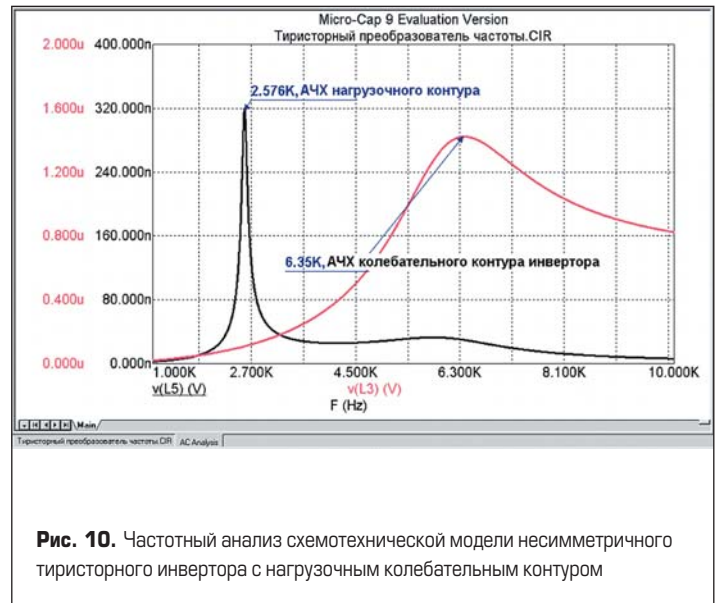


Рис. 10. Частотный анализ схемотехнической модели несимметричного тиристорного инвертора с нагрузочным колебательным контуром

го контура инвертора. Графики получены в результате малосигнального частотного анализа схемотехнической модели, подобно тому, как проводится инструментальное получение этой характеристики: изменяется в необходимом диапазоне частота синусоидального источника сигналов постоянной амплитуды, при этом регистрируется изменение напряжения на интересующих нас элементах. В данном случае нас более всего интересует АЧХ колебательного контура нагрузки: значение резонансной частоты и затухание в колебательном контуре при расстройке частоты от резонансной. Резонансная частота контура нагрузки равна 2,576 кГц, добротность контура нагрузки определяется из АЧХ. То же самое получаем для коммутирующего контура инвертора. Необходимо, чтобы процессы протекали колебательным образом, иначе в инверторе произойдет срыв инвертирования.

Результаты этого этапа исследований нужны для определения номинальной (рабочей) частоты тиристорного инвертора, выяснения возможности повышения его рабочей ча-

стоты относительно частоты включения тиристоров и определения добротности нагрузочного контура, то есть необходима ли коррекция в подключении стандартного многовиткового индуктора плавильной печи. Все эти вопросы выясняются «на кончике пера». В нашей практике еще не было случая, когда нельзя было определить способ подключения практически любого индуктора к тиристорному инвертору с точки зрения его работоспособности. Однако эффективность индукционного нагрева, то есть коэффициент использования ТПЧ по мощности, остается нерешенной задачей, практически решаемой эвристическими методами. Схемотехническое моделирование может направить пользователя по верному пути, но ответственность за решение задачи остается на нем, как и во многих других случаях использования ЭВМ, превосходство которой заключается в скорости, безошибочности, наглядности, но не в интеллекте. Для того чтобы на схемотехнической модели ТПЧ с помощью ЭВМ быстро и безошибочно получить результат, необходима большая практика.

Исследование характера электромагнитных процессов в несимметричном тиристорном инверторе

Нелинейный дроссель в инверторе

Применение нелинейного дросселя насыщения не меняет радикально характера электромагнитных процессов в инверторе, но оказывает существенное влияние на форму выходного тока ТПЧ. Если в сердечнике линейных катушек индуктивности, как правило, уровень индукции не достигает области насыщения, то в нелинейном дросселе такой режим работы сердечника является рабочим. Значительная величина потерь на перемагничивание сердечника требует ее оценки.

На рис. 11 показано окно установки параметров магнитного сердечника для катушки индуктивности L4, выполненной из 10 витков. Магнитный сердечник с параметрами .MODEL \$GENERIC CORE (AREA = 10; PATH = 20; MS = 350K; A = 15; K = 700M; ALPHA = 100U) описывает сердечник сечением 10 см², с длиной магнитного пути 20 см, выполненный из ферри-

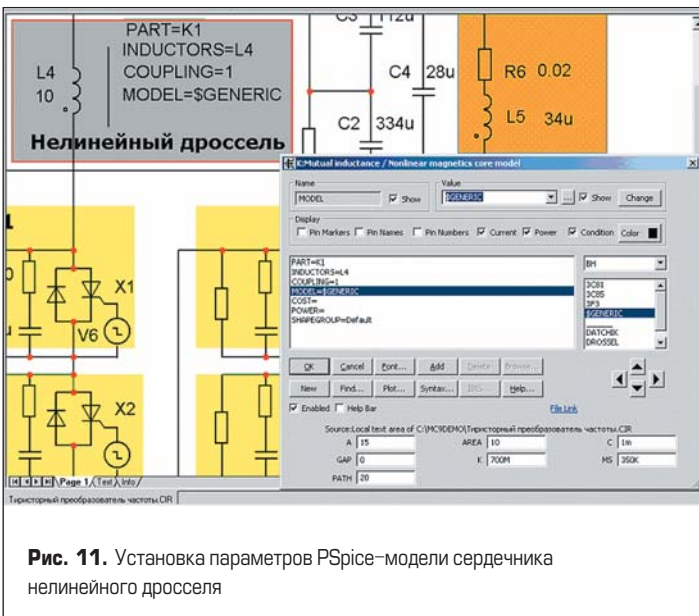


Рис. 11. Установка параметров PSpice-модели сердечника нелинейного дросселя

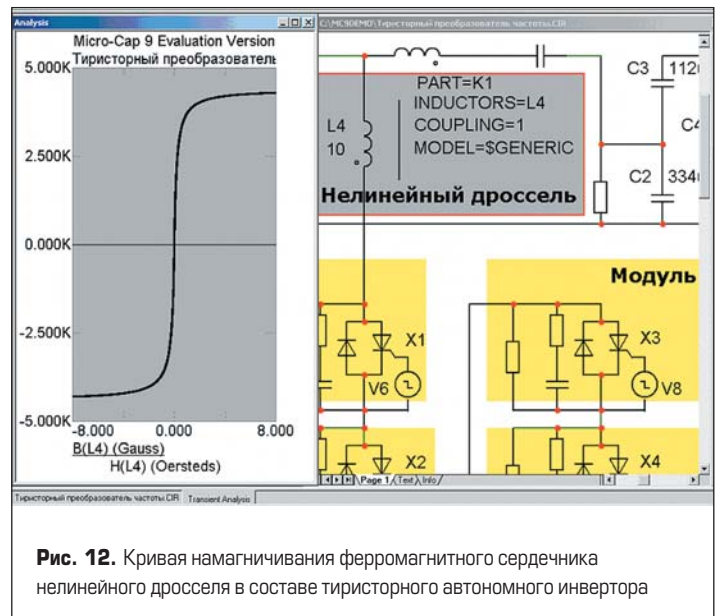


Рис. 12. Кривая намагничивания ферромагнитного сердечника нелинейного дросселя в составе тиристорного автономного инвертора

Исследование переходных процессов

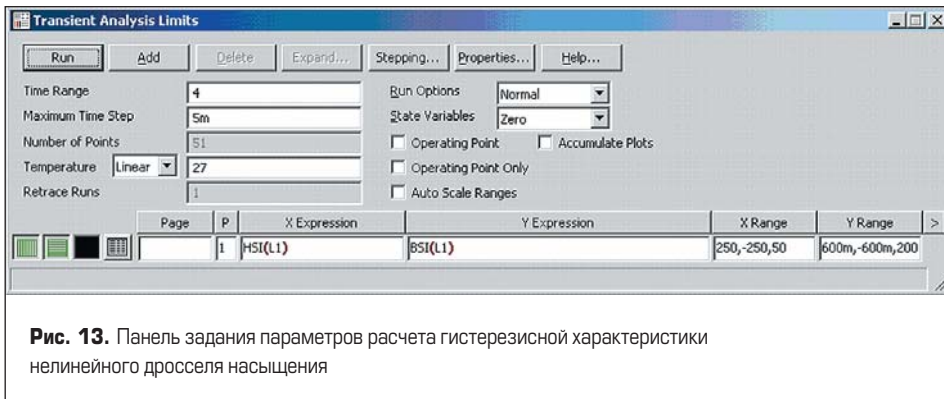


Рис. 13. Панель задания параметров расчета гистерезисной характеристики нелинейного дросселя насыщения

товых колец. Эта нелинейная индуктивность — дроссель насыщения, она осуществляет задержку тока тиристора и диода на несколько микросекунд, определяемых приложенным напряжением. Этого достаточно для значительного снижения амплитуды коммутационных перенапряжений на вентиляхном комплекте инвертора, с элементами распределения напряжений в статике и динамике.

На рис. 12 приведен участок кривой намагничивания ферромагнитного сердечника катушки индуктивности L4, из которого следует, что насыщение сердечника наступает при индукции в ферритовом сердечнике около 4 Гаусс. Дроссель насыщения является обязательным атрибутом высокочастотного инвертора. Более подробно основные характеристики дросселя насыщения и особенности его конструктивного выполнения описаны в [12, 13].

На рис. 12 приведена кривая намагничивания нелинейного дросселя B(L4) [Gauss] vs H(L4) [Oersteds], состоящего из 10 витков, расположенных на сердечнике из феррита К, описываемого PSpice-моделью со следующими параметрами: Generic Core .MODEL \$GENERIC CORE (AREA = 10; PATH = 20; MS = 350K; A = 15; K = 700M; ALPHA = 100U). Кривая, изображенная на рис. 12, получена для режима расчета Probe. Отметим, что разброс индукции насыщения у ферритов различного типа, для применения в дросселях насыщения, не имеет значения. Конструктивное выполнение дросселя имеет значительно большую важность. Экспериментальной проверкой следует уста-

новить отсутствие магнитоstrictionного эффекта ферритового сердечника на рабочей частоте ТПЧ, который может привести к его разрушению.

На рис. 13 показана панель задания в программе Micro-CAP параметров для анализа переходных процессов в сердечнике насыщающегося сердечника для получения гистерезисной характеристики, показывающей величину статических потерь активной мощности. Отметим, что на панели задан график (Plot 1) в координатах H и B, в единицах СИ (SI). Предварительный расчет по постоянному току не проводится. Автоматическое масштабирование по осям координат определено из предыдущего расчета.

На рис. 14 приведена гистерезисная характеристика намагничивания, построенная на основе уравнения Джилса-Атертона, показывающая активные потери мощности нелинейного ферритового сердечника в принятой (отечественной) системе координат. Относительная ширина петли гистерезиса показывает величину потерь, так как индукция насыщения для различных ферритовых материалов практически одинакова.

Таким образом, мы определили описания необходимых PSpice-моделей и их параметры для использования в схемотехнической модели ТПЧ. Созданная в программе Micro-CAP схемотехническая модель в дальнейшем подвергается незначительным изменениям, а ее фрагменты копируются при создании новых схемотехнических моделей.

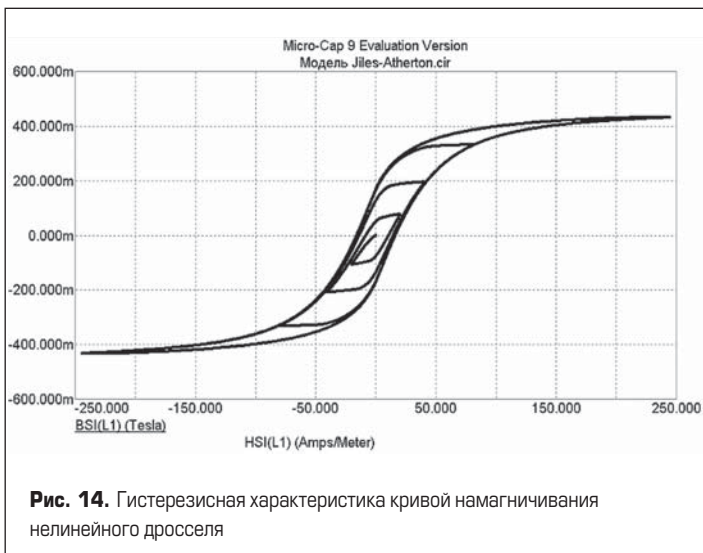


Рис. 14. Гистерезисная характеристика кривой намагничивания нелинейного дросселя

На рис. 15 приведены графики токов в тиристорном инверторе, полученные с момента его включения: ток индуктора в нагрузочном контуре инвертора; выходной ток автономного инвертора; график входного тока инвертора. Для сравнения величин и характера токов они изображены в одном масштабе. Кроме этого, для входного тока изображена его сглаженная, среднеквадратичная величина, для других токов показаны мгновенные значения. Основным результатом сравнения этих графиков является вывод о значительной добротности (Q = 3) колебательного тока в индукторе, характер которого приближен к синусоиде с увеличенной в три раза амплитудой.

На рис. 16 представлен фрагмент рассчитанных графиков, для последних 2 мс (миллисекунд) рассчитанного интервала графиков переходных процессов. Отмеченные величины амплитуды и длительности рассчитанных токов позволяют определить токовые характеристики всех полупроводниковых элементов ТПЧ.

Еще более «растянутые» по оси времени графики токов в интервале 0,5 мс, с шагом 1 мкс, показывают деформацию кривой выходного тока инвертора, обусловленную наличием в схеме нелинейного дросселя насыщения.

На рис. 17 приведены фазовые соотношения между выходным током инвертора и током контура нагрузки (в индукторе). Эти кривые показывают, что получена задержка тока диода в 15 мкс, достаточная для эффективно уменьшения перенапряжений в инверторе, вызванных обрывом обратного тока диода.

Напряжение на тиристорно-диодном силовом модуле

Амплитудная величина напряжения, прикладываемая к силовым модулям тиристорного инвертора, в настоящее время не является ограничивающим фактором при конструировании ТПЧ. В рассматриваемой схемотехнической модели последовательно включены 4 одинаковых силовых модуля, в состав

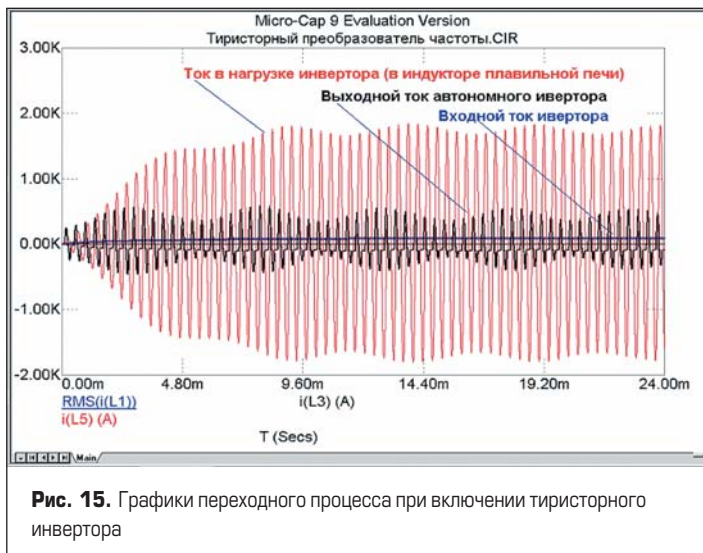


Рис. 15. Графики переходного процесса при включении тиристорного инвертора

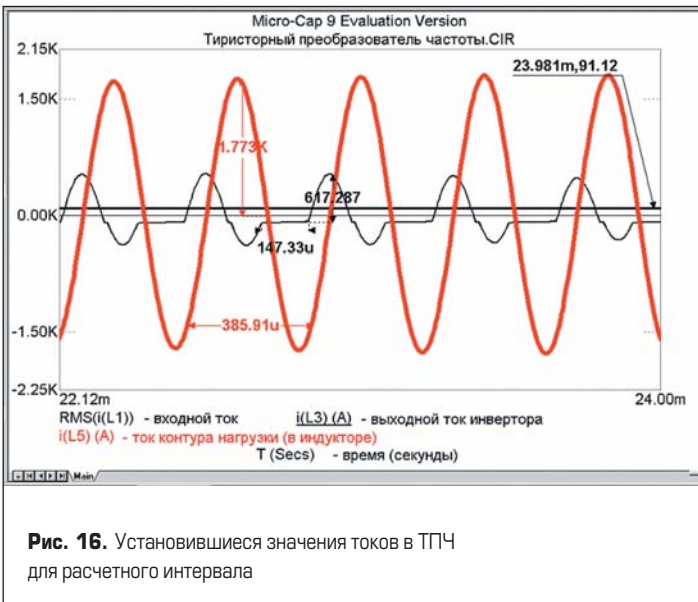


Рис. 16. Установившиеся значения токов в ТПЧ для расчетного интервала



Рис. 17. Задержка тока диода после выключения тиристора в кривой выходного тока инвертора

которых входят элементы, распределяющие постоянную составляющую напряжения и «скачки» напряжения. Названные полезные функции «снабберных» компонентов схемы сопровождаются дополнительными потерями мощности и необходимостью их охлаждения. Сейчас промышленностью освоены специальные типы резисторов и конденсаторов для указанного применения. Тем не менее проблема напряжения на силовых вентилях ТПЧ продолжает существовать в другой форме, называемой «раскачкой напряжения».

В тиристорных инверторах эквивалентные параметры резонансной нагрузки меняются в значительных пределах. Эквивалентное активное сопротивление нагрузочного контура, в который входит индуктор, заполненный «холодным — $\mu > 1$ » или «горячим — $\mu = 1$ » металлом, изменяется в несколько раз. Обратные диоды в тиристорном инверторе «сбрасывают» излишнюю реактивную мощность колебательного контура нагрузки и несколько стабилизируют напряжение на силовых элементах ТПЧ при переменной нагрузке. Тем не менее, например, при заполненном тигле плавильной печи оператору

приходится принудительно снижать рабочую частоту ТПЧ, увеличивая тем самым длительность «паузы» — непроводящего состояния полупроводниковых вентиляей. Этим не исчерпываются соображения, исходя из которых в тиристорном инверторе применяется последовательное соединение вентиляейных модулей, повышающее запас прочности наиболее уязвимых элементов силовой схемы. Увеличение количества компонентов схемы, обычно приводящее в расчетах надежности к ее уменьшению, компенсируется увеличением «запаса надежности», синергетическими преимуществами и особенностями конструктивного характера.

На рис. 18 показано напряжение на силовом модуле инвертора. Максимальная величина напряжения для номинального режима ТПЧ равна 462 В. Двойной запас по напряжению требует применения в силовом модуле тиристоров и диодов с рабочим напряжением до 1000 В.

Аварийный режим ТПЧ

На предыдущих временных диаграммах показаны режимы работы ТПЧ, характеризую-

щие номинальный режим эксплуатации полупроводниковых вентиляей. Причин аварийных режимов ТПЧ много, рассмотрим одну, наиболее вероятную, — превышение допустимого напряжения на полупроводниковых вентиляей. Такая неисправность возникает, например, при повреждении демпфирующих цепочек, установленных параллельно силовому модулю, или неисправности нелинейного дросселя в автономном инверторе. В обоих случаях наблюдается «срыв инвертирования», при котором ранее включенный тиристор не перестает проводить ток, и тогда начинает развиваться аварийный процесс, который может привести к повреждению элементов ТПЧ.

На рис. 19 показано развитие аварийного процесса в ТПЧ, вызванного «срывом инвертирования», в результате которого прекращаются колебания выходного тока инвертора и монотонно увеличивается входной ток инвертора. Скорость нарастания входного тока ТПЧ ограничена индуктивностью входного дросселя тиристорного инвертора. Подобные графики моделируют аварийные процессы при замыкании элементов на «землю», возникновении перенапряжений или сверхтоков.

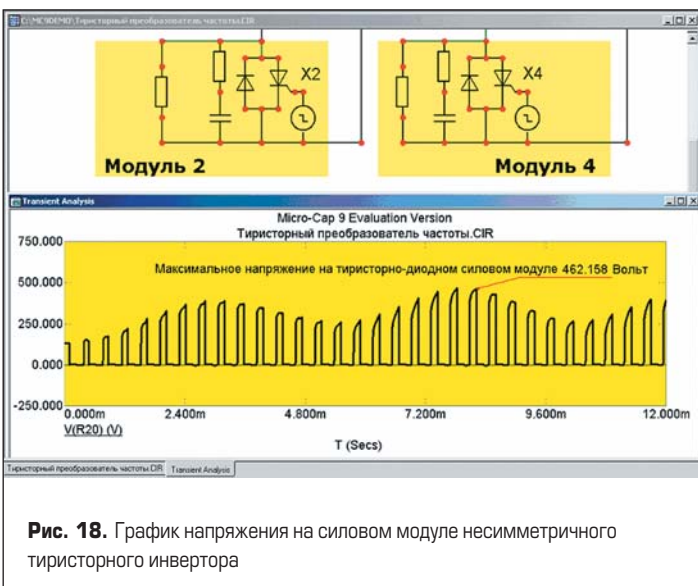


Рис. 18. График напряжения на силовом модуле несимметричного тиристорного инвертора

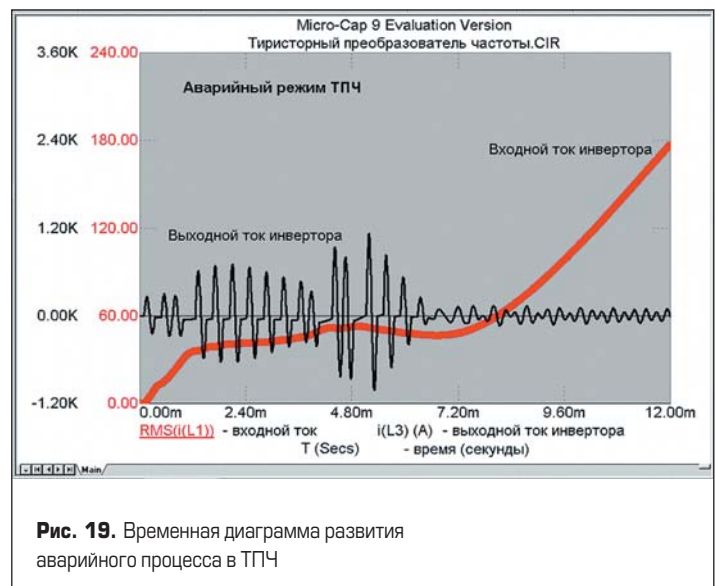


Рис. 19. Временная диаграмма развития аварийного процесса в ТПЧ

На рис. 19 применен различный масштаб для токов схемотехнической модели, по временной оси эти графики совпадают.

Важные эксплуатационные требования к высокочастотным ТПЧ, например селективная система защиты при наступлении аварийных режимов, определяются в зависимости от особенностей технического решения силовой схемы и т. д. Последний аспект, несмотря на его значимость, недостаточно освещен в литературных источниках [14, 15], устаревшая монография не отражает состояния этого вопроса, без удовлетворительного решения которого невозможно создание надежного ТПЧ.

Проверка моделирования и особенности эксплуатации индукционных плавильных комплексов

Моделирование электромагнитных процессов в схемотехнической модели силового электрооборудования, к которому относится ТПЧ для индукционного нагрева металлов, несмотря на его значительную степень достоверности и уверенности в полученных результатах исследований, требует проверки на действующем оборудовании. При этом важно соответствие результатов, допускающих перекрестную проверку и сравнение интегральных величин. Для ТПЧ такими результатами являются номинальная входная и выходная мощность, а также установленная реактивная мощность конденсаторов и индуктивностей. Эти показатели для действующего оборудования определяются косвенными методами, например замером температуры и расхода воды на входе и выходах каналов системы водяного охлаждения.

При схемотехническом моделировании нагрузочного контура показателем верности модели считается одновременная регистрация максимума входного тока инвертора и тока колебательного контура на рабочей частоте ТПЧ. Эти величины доступны прямою измерению на индукционном комплексе.

На рис. 20 приведен общий вид комплекса для индукционной плавки металлов в плавильных печах ИСТ-0,16. Комплекс установлен на участке литья для собственных нужд производственного цеха промышленного предприятия.



Рис. 20. Состав индукционного комплекса для порционной плавки металлов

ленного предприятия. К одному ТПЧ попеременно подключаются две электропечи. Плавка черных и цветных металлов производится в индукторах с набивными тиглями. Предпочтительно для плавки цветных металлов использование графитового тигля. Слева расположен блок компенсирующих конденсаторов. В центре находится тиристорный преобразователь частоты, который подключается к той или иной индукционной электропечи. Электрическая силовая схема индукционного комплекса соответствует рассмотренной в схемотехнической модели.

Для обеспечения возможности переключения выводов конденсаторной батареи с одной печи на другую применяется переключатель. Для маломощных установок (до 100 кВт) применяются высокочастотные переключатели (контакты). Как правило, индукционные печи устанавливаются симметрично относительно выходного шинпровода конденсаторной батареи. Иногда возникает необходимость переключения выводов конденсаторной батареи на несимметрично установленные печи. При этом возможна установка дополнительного конденсатора со стороны печи, для которой требуется повышенная емкость компенсирующей батареи.

Индукционная открытая плавка черных металлов и сплавов применяется на производстве для литья по выплавляемым моделям и в земляные формы. Номинальная мощность преобразователя определяется емкостью тигля плавильной печи. Используется следующая эмпирическая зависимость: мощность ТПЧ в киловаттах приблизительно равна емкости тигля в килограммах (для плавки стали, чугуна). Например, для печи ИСТ-0,06 требуется мощность преобразователя 60–100 кВт, для печи ИСТ-0,16 — 120–160 кВт, для печи ИСТ-0,25 — 250–320 кВт.

Рабочая частота преобразователя определяется емкостью тигля, размерами шихты и числом витков индуктора. Для каждой печи существует оптимальная рабочая частота, которую определяет предприятие-изготовитель. Чем выше частота (в пределах рекомендуемого диапазона), тем выше электрический КПД индукционной печи, при пониженной частоте увеличивается габаритная мощность высокочастотного оборудования. Наличие системы автоматического регулирования коэффициента мощности нагрузки, режимов ручного и автоматического регулирования выходной мощности путем изменения рабочей частоты литейного комплекса позволяет вести плавку на экономически выгодных режимах [16–25].

В таблице 3 приведены выходные параметры ТПЧ, используемых в индукционных комплексах для открытой плавки металлов в стандартных электропечах ИСТ-0,06 и ИСТ-0,16.

Таблица 3. Выходные параметры ТПЧ

Частота, кГц	Выходная мощность, кВт			
	30	63	100	160
2,4–4			×	×
8–10		×	×	×
18–22	×	×		

Источником тока повышенной частоты для питания индукционной плавильной печи служит тиристорный преобразователь частоты, выход которого подключен к батарее печных конденсаторов, разделенных на две секции — низкого и высокого напряжения. Для повышения электрического КПД индукционного нагревательного комплекса конденсаторная батарея выполнена по схеме емкостной автотрансформации напряжения. На выходе конденсатора повышающей секции располагается датчик тока контура (ДТК), представляющий собой трансформатор тока с сердечником из феррита. Фаза сигнала ДТК, относительно момента включения тиристорами инвертора, управляет ТПЧ, в результате чего рабочая частота поддерживается в соответствии с резонансным режимом нагрузки в течение плавки.

С целью обеспечения безопасности металлические части комплекса (шкафы ТПЧ, детали конденсаторной батареи, каркас индукционной печи) подключены к цеховой сети заземления. Предохранение обслуживающего персонала от ожогов при аварийном выходе из строя печи, например при пробое тигля, обеспечивается установкой индукционной печи на приямок, объем которого позволяет вместить расплавленный металл. Вытяжка газов, образующихся при плавке металла, производится подключением зоны индукционной печи к цеховой вытяжной вентиляции (рис. 20).

Шинпровод между конденсаторной батареей и индуктором выполняется медной трубкой или шиной достаточного сечения для прохождения тока в несколько тысяч ампер. Преобразователь частоты, конденсаторная батарея, индуктор и гибкие шланги индукционной печи подключены к системе водяного охлаждения, проток в каналах которой контролирует электронный блок контроля охлаждения. Система водяного охлаждения плавильного комплекса обеспечивает необходимую интенсивность охлаждения частей комплекса, при этом предусмотрен контроль давления на входе каналов охлаждения ТПЧ, батареи печных конденсаторов и индукционной печи. Кроме того, в тиристорном преобразователе частоты обеспечен контроль наличия протока воды по внутренним каналам охлаждения.

Таблица 4. Технические характеристики комплексов для индукционной плавки металлов

Технические характеристики плавильных комплексов	
Наибольшая температура плавки металла, °С	1600
Время плавки холодной/горячей печи, мин.	60/45
Внутренний (максимальный) диаметр тигля, мм	380
Высота тигля, мм	560
Внутренний диаметр индуктора, мм	540
Количество витков индуктора	16
Диаметр внешний/внутренний трубки индуктора	18/14
Реактивная мощность печных конденсаторов, кВАр	1500
Пределы регулировки выходной мощности ТПЧ, %	10–100
Расход воды на охлаждение	
Тиристорный преобразователь частоты, м³	1,5
Конденсаторная батарея, м³	0,5
Индуктор плавильной печи, м³	1,0

Для повышения надежности ТПЧ при возникновении неисправности в отдельных каналах системы водяного охлаждения применяются термоконтакты. Не рабочие режимы при эксплуатации ТПЧ — превышение рабочих токов, недостаточное охлаждение установки или отсутствие протока воды в каналах охлаждения, а также работа с открытыми дверями ТПЧ — предотвращаются блокировками и системой быстройдействующей защиты.

В таблице 4 приведены технические характеристики комплексов для индукционной плавки металлов, соответствующие данным таблицы 3.

Система автоматизированного регулирования технологического комплекса обладает свойством синергии, то есть позволяет согласованно управлять электротепловыми режимами комплекса с ограничениями по мощности, рабочей частоте и коэффициенту мощности индукционной плавильной печи.

Электрические режимы при эксплуатации индукционных плавильных комплексов

На рис. 21 показан индукционный комплекс для плавки черного металла в плавильной печи.



Рис. 21. Контроль плавки в индукционной печи

Особенностью электрических режимов при индукционной плавке является значительное отклонение комплексного сопротивления нагрузки от номинальной величины. Комплексное сопротивление системы «индуктор — металл» меняется от минимального значения до максимального. Номинальный режим работы ТПЧ и нагрузочного контура обеспечивается системой автоматической подстройки выходной частоты. Рабочая частота ТПЧ определяется емкостью тигля и размерами шихты. Чтобы достичь верхнего предела частоты, увеличивается электрический КПД индуктора и возрастают потери мощности в высокочастотном оборудовании (конденсаторной батарее, шинпроводах, высокочастотных кабелях). В начале плавки, когда температура шихты ниже точки Кюри (780 °С), добротность нагрузочного колебательного контура небольшая, потребляемая мощность от ТПЧ меньше номинальной.

При нагреве основной массы шихты до температуры магнитных превращений происхо-

дит возрастание эквивалентного сопротивления нагрузки, значительное увеличение добротности нагрузочного колебательного контура, уменьшение тока нагрузочного контура. Ослабить влияние нагрузки на режим работы преобразователя может снижение уровня задания мощности САР ТПЧ или добавление холодного металла в тигель. Напряжение на нагрузке в этом режиме на 20–30% больше номинальной величины.

При появлении расплава на уровне 3–4 витков происходит стабилизация параметров коммутирующего контура преобразователя. Напряжение на нагрузке снижается до номинальной величины, растет ток в нагрузочном колебательном контуре, мощность приближается к номинальной. В дальнейшем, по мере увеличения уровня расплавленного металла вплоть до полного тигля, происходит рост мощности преобразователя до номинальной величины. Напряжение на нагрузке в начале цикла плавки ограничивается САР канала стабилизации напряжения, а затем, по мере увеличения добротности нагрузочного колебательного контура, САР переходит в режим стабилизации коэффициента мощности нагрузки, при котором осуществляется стабилизация тока контура нагрузки.

Номинальная мощность преобразователя определяет емкость тигля, состав переплавляемого металла и требуемое время плавки. При недостаточной мощности процесс плавки затягивается. При избыточной мощности ТПЧ происходит интенсивное перемешивание расплавленного металла, вызывающее разрыв стенок тигля и снижение межремонтного ресурса печи. Косвенным признаком избыточной мощности является образование высокого мениска на поверхности расплавленного металла. Для стали и чугуна допустим мениск высотой 2–5 см, для алюминия — не более 10 см.

После расплавления металла необходимо выдержать расплав при номинальной (разливочной) температуре. В этом случае осуществляется стабилизация тока контура нагрузки или уменьшается уровень задания выходной мощности ТПЧ. При сливе расплавленного металла осуществляется подогрев тигля. По мере уменьшения количества расплавленного металла в тигле происходят обратные изменения в настройке ТПЧ.

Выходные шины ТПЧ должны иметь достаточное сечение. Индуктивность шинпровода должна быть минимальной. Параллельные шины должны располагаться на расстоянии 30–50 мм. Эквивалентная емкость конденсаторной батареи и ее реактивная мощность обеспечивают компенсацию реактивной мощности индуктора в возможном диапазоне изменения нагрузки в течение времени плавки. В конденсаторной батарее применяются сборные шины с водяным охлаждением. Отдельные конденсаторы подключаются к сборным шинам гибкими медными проводниками. Изолированные конденсаторы устанавливаются на расстоянии не менее 30 мм друг от друга или металлических частей батареи, необходимо учитывать и гидравлическое расширение корпусов.

Индукционная печь подключается к высокочастотному шинпроводу гибкими во-

доохлаждаемыми кабелями. Кабели должны иметь достаточное сечение, шланг должен быть выполнен из диэлектрического материала — для исключения поверхностных высокочастотных разрядов. Индукционная электропечь должна иметь возможность кантовки (наклона) для перемешивания расплава и слива металла в конце плавки.

В зависимости от мощности и рабочей частоты индукционной печи число витков индуктора может быть различным — от 7 до 16 витков. В связи со значительными динамическими усилиями на индуктор витки его должны быть фиксированы относительно каркаса и тигля печи, для этого применяется заливка индуктора жаропрочным бетоном. От толщины стенок тигля зависит термический КПД индукционной печи и межремонтный ресурс. При индукционной плавке индуктор должен быть смещен вниз относительно расплава в тигле на 2–3 витка.

Исходя из этих ограничений, число витков и диаметр индуктора определяются емкостью тигля индукционной печи. Полученное значение индуктивности может быть достаточным для низкочастотных печей (500–1000 Гц) и недопустимо высоким для индукционных печей повышенной частоты (2,4–8 кГц). В этом случае применяется параллельное соединение двух секций индуктора и для удобства подключения цепи контурного тока от сборных шин до индуктора применяется намотка секций индуктора в разных направлениях.

Особенности плавки цветных металлов и сплавов в индукционных тигельных печах

В графитовом тигле автоматизированный индукционный плавильный комплекс осуществляет индукционную плавку цветных металлов (например, алюминия) и сплавов (бронзы, латуни) (рис. 22). Область применения — получение литейных сплавов и переплавка отходов цветных металлов с целью изготовления литых деталей, а также для переработки и утилизации отходов цветных металлов. Технологический процесс индукционной плавки цветных металлов в графитовом тигле прогрессивен, обеспечивает повышение производительности труда и качества плавки, улучшает условия труда персонала, сокращает трудовые и материальные затраты, позволяет обеспечить экономию электроэнергии и уменьшить вредные воздействия на окружающую среду. Косвенный нагрев металла используется из-за малого сопротивления цветных металлов переменному току повышенной частоты, в результате чего прямой индукционный нагрев цветных сплавов неэффективен.

Графитовый тигель допускает переплав мелкой стружки, которую практически нельзя расплавить без тигля (в обычных низкочастотных печах). Отметим, что необходимо контролировать внутреннюю поверхность тигля. Возможность образования трещин в тигле приводит к изменению настройки преобразователя и требует контроля его качества.

Напротив, при использовании неглазурированных тиглей (особенно для плавки алюминия) возможно образование пленки застывшего металла, затрудняющей процесс вывода печи на технологический режим. Плавка в графитовом тигле, в основном, применяется в мелкосерийном производстве для раздаточных индукционных плавильных печей, обеспечивающих работу литейных машин — формовку изделий из цветного металла.



Рис. 22. Плавка в графитовом тигле раздаточной индукционной электропечи

Основными узлами тигельной электропечи являются: металлический сварной каркас с изолирующими вставками для исключения короткозамкнутых контуров тока индуктора и стойки с двухопорными осями вращения. Две опоры применяются, чтобы уменьшить вертикальное перемещение печи. Индукционная тигельная электропечь снабжается высокочастотными охлаждаемыми электрокабелями. В таблице 5 приведены технические характеристики индукционной тигельной электропечи.

Можно сделать вывод, что созданные схемотехнические модели, после уточнения параметров по результатам эксплуатационных испытаний, являются надежным средством для реновации (усовершенствования) электрической схемы ТПЧ и анализа рабочих режимов комплекса для индукционного нагрева металлов. Сегодня схемотехнические модели сопровождают реальные ТПЧ в составе технической документации индукционных комплексов на протяжении их жизненного цикла.

Заключение

- Установленная мощность источника питания ТПЧ трехфазной сети и выпрямителя, как правило, соизмерима с номинальной мощностью тиристорного инвертора. Поэтому при моделировании электромагнитных процессов в ТПЧ, предназначенном для индукционной плавки металлов, необходимо принимать во внимание параметры питающей сети и выпрямителя переменного тока.
- Схемотехническая модель ТПЧ для индукционной плавки металлов в качестве нагрузки должна содержать индуктор с колебательным контуром, настроенным в резонанс с первой или второй гармоникой выходного

Таблица 5. Технические параметры плавильной электропечи с графитовым тиглем

Технические параметры плавильной электропечи с графитовым тиглем	
Номинальная мощность, кВт	50–150
Частота тока, кГц	2,4–8,0
Электрический КПД	0,75–0,8
Емкость печи, кг	60–160
Максимальная температура плавки, °С	1000
Масса печи, кг	300
Охлаждение водяное с расходом, м³/ч	1,0–1,5
Габариты (длина×ширина×высота), мм	940×960×850

тока инвертора. Резонансная частота и добротность колебательного контура нагрузки определяются при частотном анализе схемотехнической модели.

- Индукционная электропечь с набивным тиглем для плавки черных металлов требует более широкого диапазона изменения рабочей частоты по сравнению с электропечью с графитовым тиглем для плавки цветных металлов. Поэтому согласование электропечи с эквивалентным сопротивлением графитового тигля более стабильно во времени и меньше зависит от заполнения тигля.

Автор благодарит И. Ф. Антонова за консультации, изложенные в разделе статьи по эксплуатации открытых печей с применением ТПЧ для индукционной плавки черных и цветных металлов.

Литература

1. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
2. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полирезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.
3. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
4. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
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., Зинин Ю. Исследование схемотехнической модели тиристорного преобразователя частоты с вакуумной индукционной плавильной печью // Силовая электроника. 2008. № 1.
7. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
8. Зинин Ю. М. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2008. № 4.
9. Зинин Ю. М. Проектирование малогабаритного тиристорного преобразователя повы-

шенной частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2009. № 1.

10. 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.
11. Зинин Ю. Представление нагрузки при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2008. № 1.
12. 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.
13. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
14. Глух Е. М., Зеленов В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. М.: Энергоиздат, 1982.
15. Зинин Ю. М., Васюра В. В., Дубов С. А. Устройство защиты трехфазного мостового тиристорного выпрямителя // Академия наук Республики Башкортостан. НТД. 1981. № 81-5.
16. Зинин Ю. М., Лобанов А. В. Система управления инверторно-индукционной установкой // Датчики и системы. 2008. № 5 (108).
17. Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Тиристорный преобразователь для индукционного нагрева металлов // Академия наук Республики Башкортостан. НТД. 1995. № 95-4.
18. Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П., Кряжев В. Г. Автоматизированный литейный комплекс // Академия наук РБ. НТД. 1996. № 96-3.
19. Антонов И. Ф., Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Автоматизированный индукционный комплекс // Академия наук РБ. НТД. 1996. № 96-27.
20. Ветошкин А. В., Антонов И. Ф., Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Модернизированный индукционный электротермический комплекс // Академия наук РБ. НТД. 1997. № 97-2.
21. Антонов И. Ф., Зинин Ю. М., Ройзман Ю. П. Мощная высокочастотная плавильная установка // Академия наук РБ. НТД. 1997. № 97-13.
22. Зинин Ю. М., Пейсахович В. И., Ройзман Ю. П., Ветошкин А. В. Автоматизированный индукционный комплекс // Академия наук РБ. НТД. 1998. № 98-23.
23. Зинин Ю. М., Пейсахович В. И., Ройзман Ю. П., Ветошкин А. В. Автоматизированный высокочастотный комплекс // Академия наук РБ. 1998. № 98-24.
24. Зинин Ю. М., Пейсахович В. И., Ройзман Ю. П. Индукционная печь с графитовым тиглем // Академия наук РБ. НТД. 1999. № 99-17.
25. Зинин Ю. М., Пейсахович В. И., Ройзман Ю. П. Высокочастотный комплекс для индукционной плавки // Академия наук РБ. НТД. 1999. № 99-19.