

Представление нагрузки

при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты ТПЧ для индукционной плавки металлов

В данной статье, предназначенной для специалистов силовой электроники, рассматриваются вопросы применения программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 9 при проектировании изделий преобразовательной техники.

Изложены особенности исследования схемотехнических моделей тиристорных преобразователей повышенной частоты для индукционного нагрева металлов, довольно подробно рассмотрены варианты представления (на основе PSpice-моделей) нагрузки инвертора — индуктора плавильной печи.

Рассмотрены некоторые аспекты проектирования батареи высокочастотных силовых конденсаторов для электротермической плавильной установки.

Изложена ретроспектива источников питания для установок индукционного нагрева токами высокой частоты.

Результаты исследований широко применяются при проектировании тиристорных инверторов мощностью 60–250 кВт, с выходной частотой 500–8000 Гц, используемых для плавки черных и цветных металлов в индукционных печах с весовой производительностью 60–400 кг/ч.

*Теория, мой друг, суха, но зеленеет жизни древо.
И. В. Гете, «Фауст».*

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Введение

При расчете схем силовой электроники широко использовался метод припасовывания (предложенный академиком Н. Д. Папалекси в начале прошлого века). Полупроводниковые элементы в расчетах представлялись идеальными ключами. Эквивалентное сопротивление нагрузки рассматривалось как пассивный элемент электрической схемы.

Анализ силовых схем ТПЧ производился со значительной погрешностью вследствие трудности учета «обратного влияния» резонансной нелинейной нагрузки на электромагнитные процессы в тиристорном инверторе.

При этом создавались совершенные изделия силовой электроники, такие как тиристорные преобразователи частоты — современные источники питания электротермических установок для индукционной плавки металлов токами высокой частоты.

В настоящее время применение последних версий программ схемотехнического моделирования, основанных на использовании PSpice-моделей полупроводниковых элементов, моделей взаимосвязанных катушек индуктивности с нелинейными сердечниками, обеспечивает необходимую точность анализа электромагнитных процессов в тиристорных преобразователях повышенной частоты.

Объект исследований — тиристорный преобразователь частоты для индукционной плавки металлов

На рис. 1 показан состав оборудования для индукционной плавки металлов. В него входят: 1 — плавильная печь с индуктором; 2 — батарея компенсирующих конденсаторов; 3 — тиристорный преобразователь частоты. Тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ) успешно заменили ненадежные, громоздкие, шумные и неэкономичные электромашиные генераторы высокой частоты, которые необходимо было размещать в отдельных помещениях, иногда на значительном удалении от плавильной печи.

Плавильная печь с индуктором (1) служит для порционной плавки черных и цветных металлов. Через индуктор проходит ток высокой частоты. Внутри индуктора размещается плавильный тигель из жаропрочного бетона или графита.

Батарея конденсаторов (2) компенсирует низкий коэффициент мощности индуктора, заполненного металлом. В колебательном контуре, образованном батареей конденсаторов и индуктивностью индуктора, создаются условия для резонанса тока.

Тиристорный преобразователь частоты (3) — устройство силовой электроники, состоящее из выпрямителя и автономного инвертора.

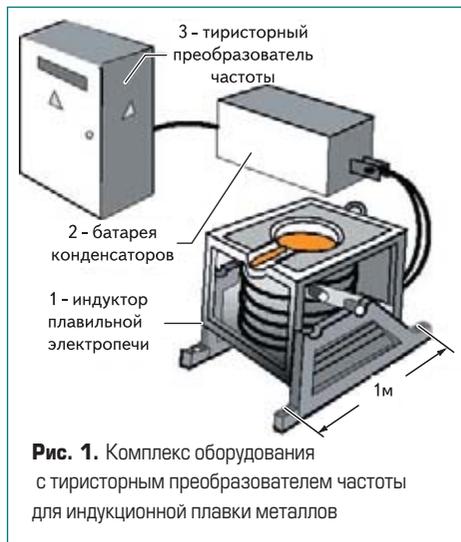


Рис. 1. Комплекс оборудования с тиристорным преобразователем частоты для индукционной плавки металлов

Выпрямитель служит источником постоянного напряжения для тиристорного инвертора.

Автономный инвертор служит для преобразования постоянного напряжения в однофазный ток повышенной частоты.

Источником питания ТПЧ является трехфазная сеть переменного тока промышленной частоты.

Процесс индукционной плавки характеризуется изменением температуры печи от «холодного» состояния металла до потери магнитных свойств (точка Кюри 750 °С). Максимальная температура расплавленного металла составляет 1600 °С.

Стоимость электротермического оборудования производственного участка промышленного предприятия составляет несколько миллионов рублей, поэтому оборудование должно работать эффективно и надежно. Эффективность — экономическая категория, она обеспечивается организационными мероприятиями. Надежность ТПЧ обеспечивается в процессе проектирования: исследованиями схемы и выбором ее компонентов, разработкой конструкции и настройкой рабочих режимов. В настоящее время проектирование невозможно представить без применения персональных компьютеров (PC).

Функциональные блоки схемотехнической модели ТПЧ

При проектировании оборудования для индукционной плавки металлов токами высокой частоты (ТВЧ) широко используется схемотехническое моделирование. Схемотехнические модели позволяют исследовать ТПЧ совместно с нагрузкой.

По схемотехническим моделям производится настройка режимов при наладке оборудования. Схемотехнические модели корректируются по результатам промышленной эксплуатации, они используются при реновации оборудования.

Схемотехническое моделирование является разновидностью **имитационного моделирования**, то есть метода компьютерного исследования, основанного на том, что реальный объект заменяется имитатором и с ним проводятся виртуальные эксперименты с целью получения информации о реакции моде-

ли на предлагаемые воздействия. Имитатор ТПЧ не обязан иметь какое-либо сходство с объектом — это программа.

Имитация как метод решения различных задач получила развитие в связи с созданием ЭВМ в 1950–60 гг. и распространением персональных компьютеров начиная с 1990 г. Затем появились программы-эмуляторы, имитирующие поведение реальных объектов в режиме реального времени. Эмуляторы применялись для управления ТПЧ.

Схемотехническое моделирование — это применение PC для исследования модели объекта в режиме условного времени. Фирма Spectrum Software в 2007 г. разработала 9-ю версию популярной в мире программы схемотехнического моделирования Micro-Cap — Microcomputer Circuit Analysis Program — **симулятора** схем электроники [1].

Все примеры далее выполнены в демо-версии программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 9 на основе PSpice-моделей ее компонентов. Это минимальные бесплатные ресурсы, доступные студентам, инженерам-схемотехникам и практическим специалистам (2–3 Мб), распространяемые через Интернет. Для профессиональной деятельности необходима полная (профессиональная) версия Micro-Cap (30 Мб и выше), возможность которой значительно больше.

Все версии Micro-Cap пользуются большой популярностью среди инженеров электронной техники, это связано с тем, что они удобны для применения в практике проектирования схем силовых преобразовательных устройств. В ранних версиях этой программы были сложности при проведении анализа схем с электромагнитными элементами — катушек индуктивности с взаимной связью через нелинейный сердечник. Сейчас присутствие в электрической схеме таких моделей не усложняет ее расчета.

Обычно программе Micro-Cap противопоставляют следующие преимущества других программ схемотехнического моделирования: возможность работы в пакете с программами компоновки устройств электроники, трассировки проводников и изготовления печатных плат. Для проектирования устройств силовой электроники перечисленные возможности не нужны.

Схемотехническая модель в программе Micro-Cap практически повторяет принципиальную электрическую схему моделируемого устройства, причем в последней, 9-й версии можно использовать европейский стандарт условных графических обозначений (УГО) компонентов или, как в предыдущих версиях, отредактировать их изображение самостоятельно. Встроенный редактор позволяет изменить или добавить новое изображение элемента схемы, для приведения к привычному виду.

Первый этап создания схемотехнической модели тиристорного преобразователя частоты — изображение схемы проектируемого устройства в рабочем поле файла .cir программы схемотехнического моделирования средствами графического редактора Micro-Cap.

На рис. 2 показаны созданные схемотехнические модели следующих функциональных узлов комплекса для индукционной плавки металлов — трехфазного выпрямителя, тиристорного преобразователя повышенной частоты и параллельного колебательного контура нагрузки.

Изображенные функциональные блоки модели можно исследовать самостоятельно, что уменьшает необходимые ресурсы ЭВМ, но не позволяет учесть их обратное влияние, характерное для силовой электроники. Взаимное (обратное) влияние называют иногда электромагнитной совместимостью. В электрических схемах дискретной и аналоговой «инфор-

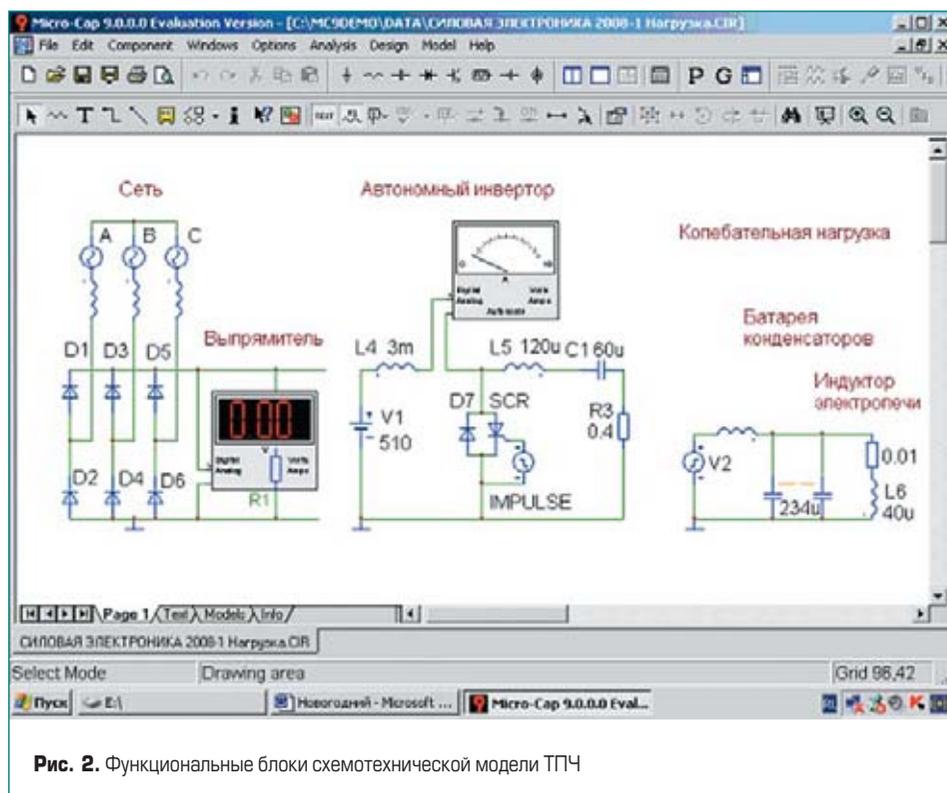


Рис. 2. Функциональные блоки схемотехнической модели ТПЧ

мационной» электроники влияние нагрузки на протекание электромагнитных процессов в остальной схеме отсутствует. Считается, что функциональные узлы такой схемы обладают однонаправленным действием.

Модель сети переменного тока и мостового трехфазного выпрямителя

На рис. 2 показано рабочее окно программы Micro-Cap 9, с созданным файлом .cir. Слева показана схмотехническая модель трех фаз (А, В и С) сети переменного тока и диодного трехфазного мостового выпрямителя. Выпрямитель нерегулируемый, как это принято в Уфимской школе тиристорных преобразователей частоты.

Бесконтактное включение выпрямителя и его аварийное выключение осуществляется последовательным тиристором в цепи выпрямленного тока. Эти элементы далее не рассматриваются и не изображены на схеме.

Разработанная схмотехническая модель включает в себя симметричный источник переменного тока с амплитудой напряжения 310 В, частотой 50 Гц, моделирующий трехфазную сеть переменного тока промышленной частоты.

Модели фаз А, В и С: .MODEL 3PHASEA SIN (F=50 A=310 RS=0,01); .MODEL 3PHASEB SIN (F=50 A=310 PH=2,0944 RS=0,01); .MODEL 3PHASEC SIN (F=50 A=310 PH=4,1888 RS=0,01), где F — частота источника (Гц), A — амплитудная величина напряжения (В), RS — внутреннее сопротивление (Ом). Параметры PSpice-моделей иллюстрируют инженерный подход к ее описанию.

На выходе неуправляемого выпрямителя включаем нагрузочный резистор. Для индикации величины выпрямленного напряжения воспользуемся цифровым вольтметром, впервые введенным в компоненты 9-й версии Micro-Cap.

На рис. 3 показано рабочее окно результатов моделирования выпрямителя после задания режима анализа переходных процессов. Подмену Probe Transient, AC позволяют оперативно получить временные диаграммы напряжения или тока любого компонента схемы выпрямителя, как это показано ниже. Предварительно необходимо задать реализуемые параметры расчета — интервал времени 30 мс, шаг расчета 1 мкс и др.

На выходе мостовой трехфазной схемы выпрямителя получаем номинальное напряжение 510 В. Отметим, что в устройствах силовой электроники часто возникает необходимость определять действующие, средние или амплитудные значения. Программы схмотехнического моделирования позволяют определить эти величины за последний интервал расчета.

На рис. 3 показаны напряжения трех фаз питающего напряжения промышленной частоты, ток фазы А и выходное напряжение выпрямителя. Выпрямитель нагружен на резистор R1, имитирующий нагрузку, — ТПЧ. Коммутация диодов выпрямителя происходит в течение конечного интервала времени, определяемого паразитной индуктивностью сети. Величина выходного напряжения составляет 504 В и определяется, в основном, амплитудой и внутренним сопротивлением моделей фаз А, В и С.

Схмотехническая модель тиристорного инвертора с омической нагрузкой

На рис. 2 в центре приведена схмотехническая модель несимметричного автономного тиристорного резонансного инвертора.

Инвертор называется резонансным, так как периодический характер электромагнитных процессов в нагрузке обусловлен колебательными свойствами коммутирующего контура инвертора. Приведенную схему инвертора называем бирезонансной, когда его колебательная нагрузка настраивается на вторую гармонику выходного тока. Такие настройки инвертора не различаются при омическом представлении нагрузки, но отличаются обратным влиянием колебательной нагрузки.

Измерительный прибор на входе автономного инвертора позволяет наглядно контролировать потребляемую мощность при изменении частоты и сопротивления нагрузки инвертора.

Номинальное напряжение выпрямителя в исследуемой схмотехнической модели тиристорного инвертора представлено автономным источником постоянного напряжения V1 величиной 510 В. Эта замена позволяет уменьшить необходимые ресурсы ЭВМ. Минимальное время расчетов переходных процессов в схеме выпрямителя составляет 20 мс, за это

время в тиристорном инверторе происходит несколько сотен периодов колебаний рабочей частоты. Применение «электронной лупы» позволяет выделить и показать необходимый интервал расчета, но игнорирует до 99% массива расчетных данных.

Исключение из схмотехнического файла ТПЧ выпрямителя и замена его источником постоянного тока позволяют значительно сократить вычислительные ресурсы РС. Расчетные файлы Micro-Cap 9 с расширением .TSA (расчет переходных процессов), приведенные на рисунках в виде графиков, составляют объем 30–300 МБ.

Устанавливаем в схмотехнической модели период включения тиристорных 400 мкс, что соответствует частоте включения тиристора 2,5 кГц. Частоту включения тиристора задает импульсный источник, моделирующий работу системы управления ТПЧ. Параметры модели Impulse соответствуют управляющим импульсам тиристора VS1 — длительность импульсов 20 мкс, амплитуда 15 В, период повторения 400 мкс. PSpice-модель источника импульсов — .MODEL IMPULSE PUL (P1=0 P2=0 P3=20U P4=20U P5=400U VONE=15).

Нагрузкой инвертора является омическое сопротивление R1=0,4 Ом. Изменяя величину нагрузочного резистора, рассчитываем интересные нас графики, выявляя диапазон, соответствующий резонансному режиму работы инвертора и заданной величине входного тока.

Модель дросселя L4 можно дополнить нелинейным сердечником с воздушным зазором, тогда его индуктивность, при задании числа витков обмоток и коэффициента связи между ними, будет рассчитываться программой. Такая модель позволяет учесть параметры сердечника и величину воздушного зазора [2].

В схмотехнической модели тиристорного инвертора используются PSpice-модели высоковольтных, высокочастотных диодов и быстродействующих тиристорных. Возможность использования PSpice-моделей полупроводниковых элементов мировых производителей, а также точность представления их параметров оказывают неоценимую помощь разработчикам изделий силовой электроники.

Тиристоры в схмотехнической модели инвертора представлены макросом из библиотеки программы Micro-Cap версии MC9DEMO\library\SCR.MAC. Модели силовых диодов тиристорного инвертора и выпрямителя одинаковы. Тиристор инвертора работает в условиях естественной коммутации резонансного тока. Сброс избыточной реактивной мощности, уменьшающей «раскачку» напряжения на элементах инвертора, осуществляет обратный диод. Параметрическая стабилизация внутренних напряжений и токов инвертора позволяет расширить возможный диапазон изменения эквивалентных параметров нагрузки.

Представление нагрузки омическим сопротивлением дает возможность уточнить параметры коммутирующих элементов инвертора — C1 и L5 и определить необходимое эквивалентное сопротивление колебательного

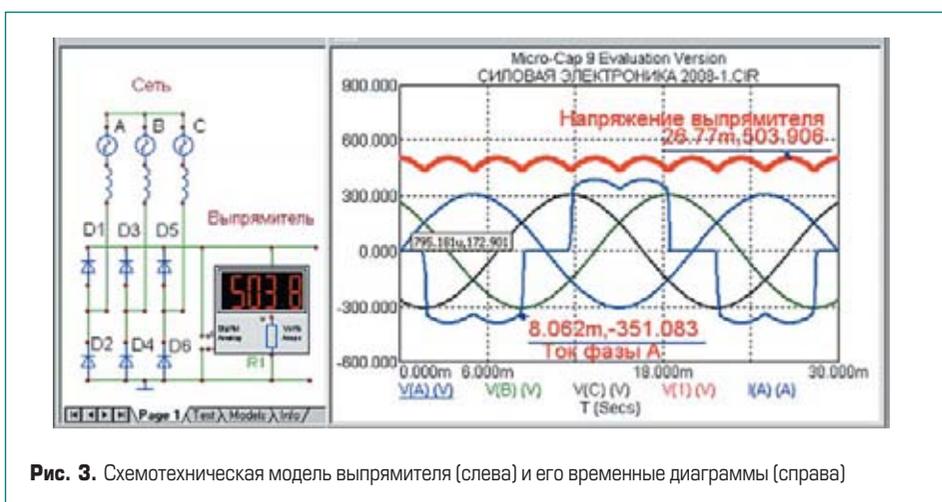


Рис. 3. Схмотехническая модель выпрямителя (слева) и его временные диаграммы (справа)

контура нагрузки, настроенной в резонанс с первой либо второй гармоникой выходного тока инвертора.

В профессиональной версии Micro-Cap силовые электрические схемы изображаются без упрощений. Это позволяет учесть принципиальные особенности силовой схемы — наличие демпфирующих цепочек, последовательное соединение полупроводниковых вентилялей, паразитные индуктивности, емкости и т. д.

Соответствие электромагнитных процессов в тиристорном инверторе результатам исследования схмотехнической модели превращает проектирование в виртуальную реальность. Одинаковыми словами описываются процессы в реальной электрической схеме и схмотехнической модели. Однако на физической модели невозможно провести «идеальный» эксперимент, например, изменить индуктивность катушки, сохраняя постоянной ее активное сопротивление на переменном токе.

В 9-й версии Micro-Cap, впервые в процессе схмотехнического моделирования, компонентам схемы можно присвоить паразитные параметры и произвести «идеальный» эксперимент. В этом случае необходимо решение обратной задачи: измерить инструментальными средствами и реализовать необходимые параметры элемента, полученного моделированием.

Моделирование нагрузочного контура с индуктором и конденсаторной батареей

Ранее показаны возможности режима анализа переходных процессов в схмотехнической модели ТПЧ, состоящей из расчетных моделей нелинейных компонентов и омической нагрузки. В тиристорном инверторе по схеме рис. 2 присутствует колебательный контур, колебательный режим в котором обеспечивается наличием реактивных элементов и малой величиной внесенного сопротивления нагрузки.

Характер изменения электромагнитных процессов также свидетельствует о наличии колебаний в тиристорном инверторе. Более того, именно колебательный характер протекания тока обеспечивает коммутацию (выключение) тиристора и работоспособность инвертора. Однако попытка исследования частотных свойств автономного инвертора с замещением нагрузки омическим сопротивлением не будет успешной.

Частотный анализ при схмотехническом моделировании позволяет исследовать влияние резонансной нагрузки на работу тиристорных преобразователей частоты. Для этого необходимо представить нагрузку ТПЧ не эквивалентным сопротивлением, как это часто делается, а колебательным контуром.

Частотный анализ схмотехнической модели нагрузки

Модель резонансной нагрузки, согласно рис. 4 (справа), содержит симметричный импульсный источник напряжения и последо-

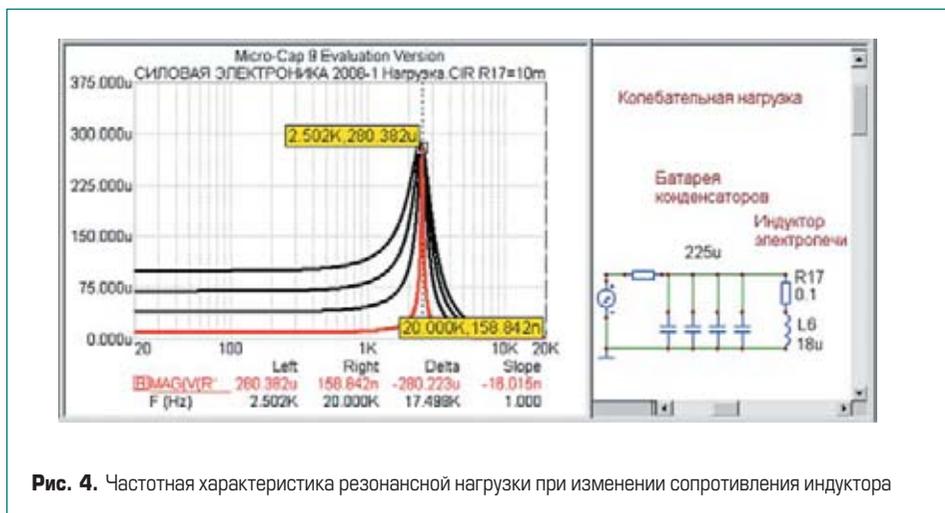


Рис. 4. Частотная характеристика резонансной нагрузки при изменении сопротивления индуктора

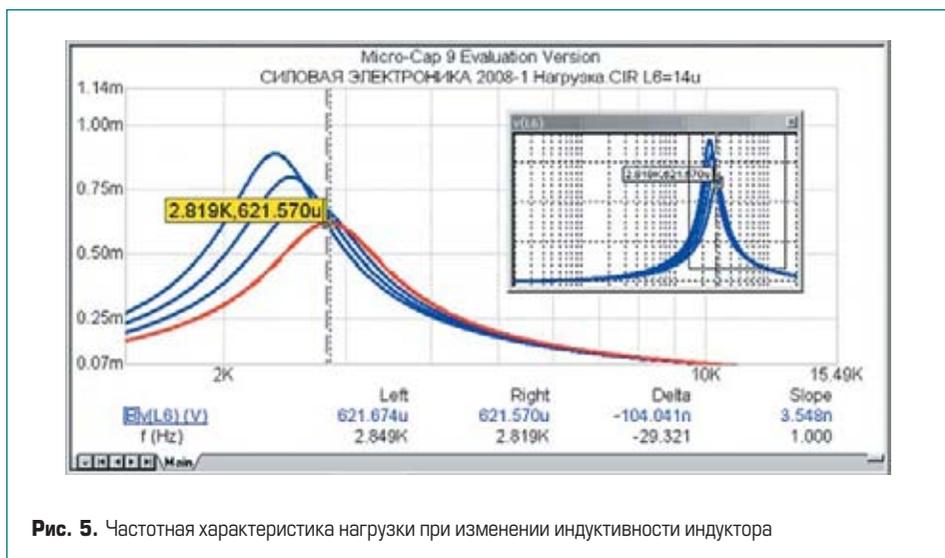


Рис. 5. Частотная характеристика нагрузки при изменении индуктивности индуктора

вательный балласт, превращающий его в источник тока, имитирующий последовательный инвертор.

На рис. 4 приведены результаты частотного анализа колебательного контура, образованного индуктивным сопротивлением индуктора L6, омическим сопротивлением индуктора R17 и батарейей компенсирующих конденсаторов. В режиме Stepping варьировалась величина сопротивления. Максимум резонансной кривой соответствует частоте 2,502 кГц.

Величина омического сопротивления определяет добротность исследуемого контура. Фиксируем амплитуду напряжения на индукторе и его частоту при указанных на рис. 4 параметрах параллельного колебательного контура. Эти величины соответствуют параметрам индуктора для плавильной печи, подключенного к батарее компенсирующих конденсаторов и к выходу тиристорного инвертора [3].

Для нелинейной схемы (содержащей нелинейные модели полупроводниковых приборов: диодов, тиристоров, магнитных сердечников) перед началом частотного анализа проводится расчет схемы по постоянному току (в отсутствие входного сигнала). В окрестности найденного режима схема представляется линейной моделью. Это можно сделать, если возмущающее воздействие мало по сравнению с параметрами рабочей точки схемы, что, собственно, и имеет место при проведении частотного анализа.

Программой производится линейризация модели в окрестности рабочей точки, и анализ фактически производится не для исходной схемы с нелинейными моделями, а для линейной, учитывающей малое возмущение. Затем к входу схемы подсоединяется источник сигнала (Sine Source, Pulse Source, User Source). Форма источника сигнала не важна для частотного анализа (AC). Это понятно, если вспомнить инструментальную процедуру определения этой характеристики. Можно представить, что к точкам присоединения источника подключен генератор синусоидальных импульсов переменной частоты. Величиной напряжения на интересующем нас элементе схемы, при изменении частоты генератора сигналов, формируется соответствующая характеристика.

Эти действия производятся над схмотехнической моделью. В режиме предшествующего анализа по постоянному току производится линейризация рабочих точек ВАХ компонентов модели. Отметим, что в результате частотного анализа схемы тиристорного инвертора мы получили максимум АЧХ, соответствующий резонансной частоте колебательного контура нагрузки. На рис. 5 показано смещение максимума резонансной кривой при изменении индуктивности индуктора.

После проведенных исследований, в ходе которых уточняются параметры функцио-

нальных узлов ТПЧ, из схемотехнической модели (рис. 2) исключаются источник постоянного напряжения V1, импульсный источник сигналов V2 и омическое сопротивление нагрузки тиристорного инвертора R1. Тиристорный инвертор с колебательным контуром нагрузки подключается к выпрямителю.

Включаем режим расчета переходных процессов и получаем диаграмму входного и выходного тока ТПЧ в виде, показанном на рис. 6. Причиной нарушений в работе инвертора служит обратное влияние параметров нагрузочного контура (текущей фазы и амплитуды колебаний) на электромагнитные процессы в инверторе.

Из сказанного следует, что проводить исследование электромагнитных процессов в тиристорном инверторе необходимо совместно с колебательной нагрузкой. Представление нагрузки в виде колебательного контура позволяет учесть ее резонансные свойства и обратное влияние на автономный инвертор.

Критерий соответствия омической и резонансной нагрузки

Основным критерием соответствия омической и колебательной нагрузки в схемотехнической модели ТПЧ является одинаковая величина входного тока автономного инвертора. При резонансе эквивалентное сопротивление нагрузки максимально.

На рис. 6 аварийный режим объясняется превышением допустимой величины входного тока автономного инвертора, при котором время восстановления тиристорного инвертора снижается меньше допустимого. В реальном ТПЧ такая ситуация (срыв инвертирования) вызывает отключение инвертора системой защиты.

В профессиональной версии, не ограниченной количеством использованных компонентов схемотехнической модели, тиристорный инвертор моделируется совместно с системой защиты от аварийных режимов. Профессиональная версия Micro-Cap позволяет выполнить силовую электрическую схему ТПЧ, систему управления, регулирования и защиты полностью. В этом случае исследования схемотехнической модели производятся без существенных упрощений.

Увеличение сопротивления нагрузки приводит к увеличению мощности автономного инвертора, но уменьшает время восстановления управляемости тиристора [4]. Одновременное и противоречивое действие рассмотренных факторов на характер изменения электромагнитных процессов в автономном инверторе находит отражение в осциллограммах, полученных при исследовании приведенной схемотехнической модели, при подключении колебательного контура нагрузки к автономному инвертору.

Представление колебательной нагрузки ТПЧ

На рис. 7 показан вариант представления колебательной нагрузки ТПЧ, в котором индуктор представлен двумя индуктивностями с магнитной связью между ними. Такое представление индуктора позволяет изменять коэффициент связи (Coupling 0...1) между ка-

тушками, имитируя параметры индуктора, при изменении рабочей частоты. Частотная характеристика будет смещаться по оси частот, согласно рис. 5. Коэффициент связи — дополнительный параметр для представления колебательной нагрузки при изменении частоты инвертора.

Рис. 7 демонстрирует увеличение напряжения на индукторе в сравнении с выходным напряжением тиристорного инвертора. Увеличение напряжения необходимо для применения типового индуктора индукционной электропечи.

Уточнение свойств нагрузочного контура ТПЧ представляется возможным, если модель индуктора дополнить нелинейным сердечником K2, как это показано на рис. 8. Сердечник K2 обеспечивает магнитную связь между витками индуктора. Дополнительным удобством такого представления модели нагрузки является задание непосредственного параметра индуктора — числа витков.

На рис. 8 (слева) приведена модель индуктора, составленная по данным таблицы 1. Параметры сердечника определены по кривой намагничивания стали.

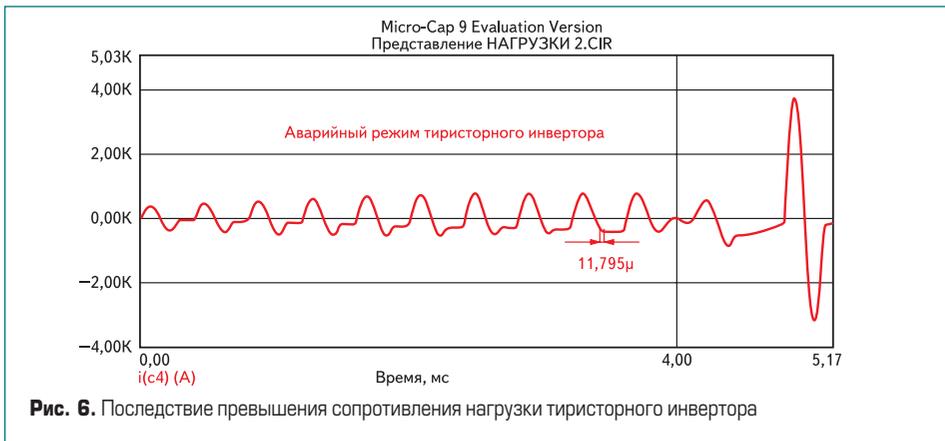


Рис. 6. Последствие превышения сопротивления нагрузки тиристорного инвертора

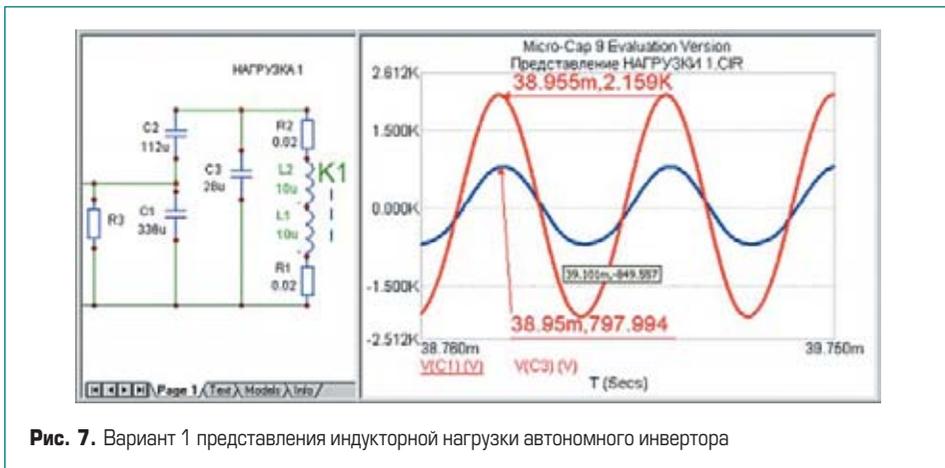


Рис. 7. Вариант 1 представления индукторной нагрузки автономного инвертора

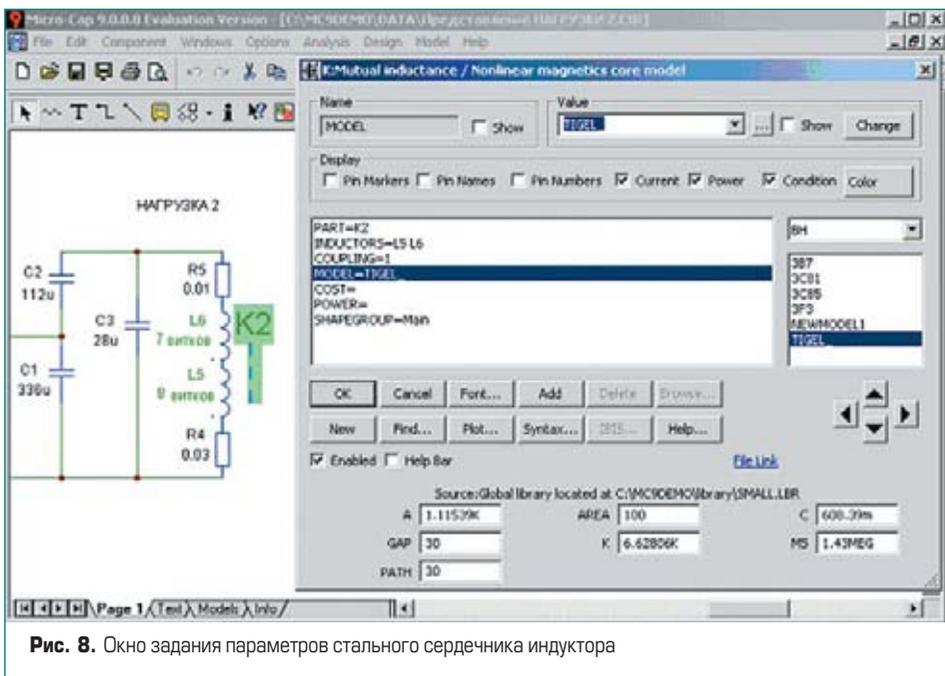


Рис. 8. Окно задания параметров стального сердечника индуктора

В последнем варианте индуктор представлен катушкой с заданным числом витков. В приведенной расчетной модели нелинейного сердечника используются следующие параметры: MS — намагниченность насыщения, A — параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания, C — постоянная упругого смещения доменных границ, K — постоянная подвижности доменов. Эти параметры получены моделированием кривой намагничивания.

Геометрические параметры сердечника — Area (площадь), Path (длина магнитной линии) и Gap (зазор) PSpice-модели ферромагнитного сердечника — представляют тигель для индуктора и позволяют изменять эквивалентные параметры нагрузки ТПЧ.

Расчетная модель ТПЧ с батареей конденсаторов и индукторной нагрузкой

На рис. 9 приведена полученная схемотехническая модель ТПЧ с колебательной нагрузкой. Модель удобна для исследования переходных и установившихся процессов, в ней использованы описанные выше компоненты. Батарея конденсаторов представлена в виде высокочастотных электротермических конденсаторов, соответствующих номинальному ряду. Частота нагрузочного контура составляет 2500 Гц.

Эта модель служит для определения номинальных параметров коммутирующих эле-

ментов тиристорного инвертора. Критерием согласования напряжения на нагрузке и выходного напряжения инвертора является получение необходимой частоты и мощности инвертора.

На рис. 10 представлены результаты исследования электромагнитных процессов в индукторной нагрузке. По ним можно установить добротность колебательного контура нагрузки и необходимую реактивную мощность батареи компенсирующих конденсаторов.

Резонансные свойства контура нагрузки вызывают протекание в нем тока высокой частоты 2–3 кГц величиной до нескольких тысяч ампер. Ток в резонансном контуре плавильной электропечи в 5–10 раз больше, чем величина тока от ТПЧ (cosφ = 0,1 — средний коэффициент мощности индуктора плавильных печей).

Представление тигля в нагрузке ТПЧ

При плавке металлов эквивалентное сопротивление индуктора изменяется от минимальной величины до максимальной (или в обратном порядке, в зависимости от настройки индукционной электропечи).

В таблице 1 приведены результаты расчетов индукторов для плавки стали в печи ИСТ 0.25. При необходимости расчета индукторов достаточно формализованной многими авторами задачи. Мы пользуемся ставшими классическими расчетами по А. Н. Шамову и А. Е. Слухоцкому, несколько различающимися по методи-

Таблица 1. Результаты расчетов индукторов для плавки стали в печи ИСТ 0.25

Параметры индуктора для плавки стали	
Исходные данные	
Частота рабочего тока индуктора	f = 2400 Гц
Внутренний радиус	R1 = 17 см
Длина индуктора	l1 = 40 см
Число витков	w = 14
Толщина стенки	τ = 0,2 см
Расчетные значения	
Сопротивление меди (при 20...50 °С)	ρ1 = 1,85 · 10 ⁻⁶ Ом·см
Глубина проникновения тока в медь	Δm = 0,14 см
Реактивное сопротивление индуктора	X1 = 0,61 Ом
Активное сопротивление меди индуктора	r1 = 6,405 · 10 ⁻³ Ом
Индуктивность индуктора	Li = 40,43 мкГн
Параметры плавильной печи. Исходные данные	
Радиус тигля	R2 = 12 см
Длина тигля	l2 = 30 см
Расчетные значения	
Удельное сопротивление стали (T=1000 °С)	ρ2 = 122 · 10 ⁻⁶ Ом·см
Глубина проникновения тока в сталь	Δc = 1,134 см
Активное сопротивление тигля	r2 = 2,702 · 10 ⁻⁴ Ом
Индуктивность тигля	L2 = 7,191 · 10 ⁻⁸ Гн

ке, но дающими практически одинаковые результаты [5, 6]. Расчетные параметры используются при схемотехническом моделировании ТПЧ с индукционной нагрузкой, представляемой нелинейным сердечником.

Чем больше разница между сопротивлением медного индуктора и сопротивлением расплавляемого металла (сталь, сплавы на основе алюминия или меди), тем больше мощность и скорость нагрева.

Развитие электротермического оборудования для индукционной плавки

Уровень моделирования схем силовой электроники в настоящее время достаточно высок. Для исследования схем силовой электроники с большим количеством нелинейных элементов схемотехническое моделирование является панацеей, о которой мечтали поколения инженеров электронной техники.

Отметим, что прогресс в силовой электронике определяется, в первую очередь, улучшением технических характеристик применяемых полупроводниковых приборов — силовых тиристоров и диодов. В силовой схеме тиристорного инвертора мощностью 120 кВт, частотой 2,4 кГц, разрабатываемой 35 лет тому назад, использовались 32 тиристора. Сейчас такую мощность и частоту обеспечивают 4 тиристора. Скоро можно будет использовать один тиристор.

Известно, что минимальная мощность источника ТВЧ составляет 1,0–1,4 кВт/кг расплавленного металла. Частота тока ВЧ определяется емкостью плавильного тигля и составом шихты. Обычно в индукционных печах используется ток высокой частоты — 500–8000 Гц. Большие плавильные печи работают на мень-



Рис. 9. Схемотехническая модель ТПЧ с индукторной нагрузкой

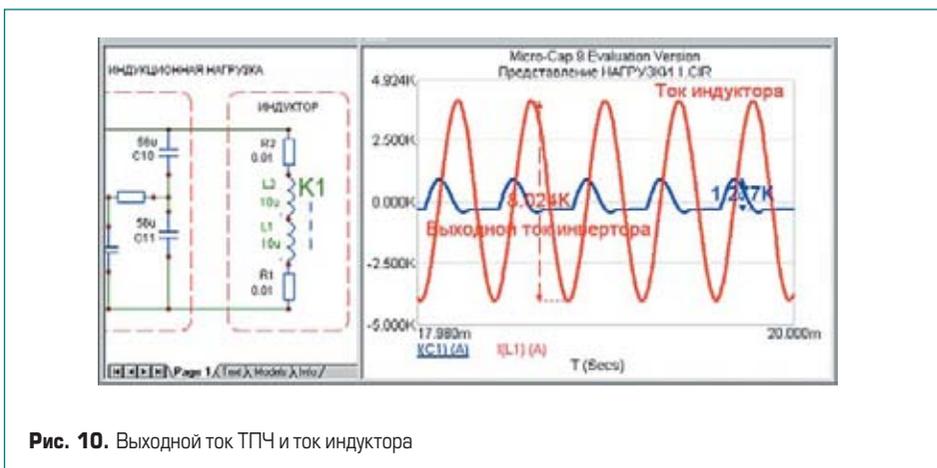


Рис. 10. Выходной ток ТПЧ и ток индуктора

ших частотах. Для плавки цветных металлов, не обладающих магнитными свойствами, используется индукционная печь с графитовым тиглем.

Рассмотрим некоторые аспекты проектирования батареи высокочастотных силовых конденсаторов электротермической плавильной установки.

После выбора мощности и рабочей частоты ТПЧ определяем схему подключения и необходимые емкости конденсаторов, обеспечивающие резонанс тока в индукторе и согласование его с ТПЧ. Конденсаторы объединяются в конструктивный узел установки индукционного нагрева, называемый компенсирующей батареей конденсаторов.

По результатам расчетов схемотехнической модели определяются максимальные значения токов, согласно которым проектируются медные или алюминиевые шинопроводы с воздушным охлаждением и гибкие водоохлаждаемые токоподводы. Это, естественно, не находит отражения при схемотехническом моделировании.

Рассмотрим этап проектирования установки ТВЧ, в котором определим полную реактивную мощность батареи компенсирующих конденсаторов, затем выберем их тип и схему включения. Это позволит рассчитать необходимое количество конденсаторов в батарее.

Для согласования номинального выходного напряжения несимметричной схемы резонансного тиристорного инвертора (250 В) и типового (14-виткового) индуктора электропечи нами используется автоконденсаторная схема подключения батареи компенсирующих конденсаторов (повышающая выходное напряжение).

Электротермические (печные) конденсаторы — громоздкие изделия силовой электроники, которые предназначены в первую очередь для повышения низкого коэффициента мощности индукционных электропечей. В параллельном резонансном контуре, образованном индуктором электропечи и компенсирующими конденсаторами, протекает ток величиной в несколько тысяч ампер, поэтому индуктор и конденсаторы охлаждаются потоком воды. Габариты и вес батареи компенсирующих конденсаторов для плавильной ВЧ-установки достаточно велики и примерно

равны габаритам и весу тиристорному преобразователю или индукционной плавильной электропечи.

Схемотехническую модель батареи компенсирующих конденсаторов плавильной установки, изображенную на рис. 7, представим в виде принципиальной электрической схемы, согласно рис. 11.

Определяем тип конденсаторов — ЭСВК-0.8-2.4, имеющих 4 вывода по 14 мкФ, суммарной емкостью 56 мкФ. На рис. 11 (снизу) показана схема включения конденсаторов. На схеме двойными индексами обозначены отдельные секции конденсаторов необходимой емкости.

Индуктор должен быть рассчитан на номинальное выходное напряжение, для этого используется параллельно-последовательная схема компенсации. Измерить величину тока нагрузочного контура затруднительно, но практически в этом не возникает необходимости, если используется схемотехническое моделирование.

Реактивная мощность силовых конденсаторов рассчитывается исходя из произведения рабочей частоты, квадрата действующего напряжения и номинальной емкости или определяется в процессе схемотехнического моделирования.

Таким образом, в результате схемотехнического моделирования мы определим необходимую мощность автономного инвертора с нагрузкой, в которой использована схема и необходимые емкости конденсаторов, показанные на рис. 11. Тип и схема включения конденсаторов позволяют рассчитать необходимое количество конденсаторов в батарее.

Для согласования номинального выходного напряжения несимметричной схемы резонансного тиристорного инвертора (250 В) и типового (12-виткового) индуктора электропечи используется автоконденсаторная схема подключения батареи компенсирующих конденсаторов (повышающая выходное напряжение).

На рис. 12 изображен вариант схемы подключения индуктора плавильной печи ИСТ-04 к тиристорному преобразователю. Цветными прямоугольниками выделены отдельные секции конденсаторной батареи. Приведена схема подключения конденсаторов к шинопроводам: показан порядок размещения корпу-

сов конденсаторов в схеме емкостного умножителя напряжения, уменьшающий потери энергии в шинопроводах.

Рациональное подключение конденсаторов обеспечивает необходимую емкость и рабочее напряжение при полном использовании установленной реактивной мощности конденсаторов и уменьшает длину пути протекания резонансного тока. Сопротивление токоподводов считается допустимым, если падение напряжения в них не превышает 15 В. Отсюда рассчитывается необходимое сечение проводников на рабочей частоте.

Подключение от автономного инвертора к конденсаторной батарее может осуществляться медными или алюминиевыми шинами, коаксиальным высокочастотным кабелем, одножильным проводом и многожильным кабелем, применяемым в сетях промышленной частоты.

Для передачи энергии ТВЧ на значительные расстояния (до 100 м) применяется кабель коаксиального типа ВГИК или малоиндукционный кабель типа МТК (1000 В, 8 кГц, 250 А). При небольшом расстоянии от ТПЧ применяется кабель промышленной частоты с чередованием направления тока в проводниках, так чтобы ВЧ-ток в них протекал в противоположных направлениях.

Стоимость индукционной электропечи с батареей компенсирующих конденсаторов значительно превышает другие расходы на оборудование участка индукционной плавки, в том числе и стоимость ТПЧ. Повышением эффективности использования ВЧ-оборудования объясняется внимание к вопросам представления нагрузки при проектировании ТПЧ. Электромашинные генераторы не позволяли изменять рабочую частоту плавильной установки. Во время плавки изменяется комплексное сопротивление индуктора электропечи, поэтому в батарее компенсирующих конденсаторов применялись высокочастотные контакторы.

Переключение электромеханическими контакторами конденсаторов компенсирующей батареи является техническим атавизмом. Высокочастотный контактор индукционной электропечи исчез как рудимент в связи с применением ТПЧ, позволяющим изменять рабочую частоту плавильной установки.

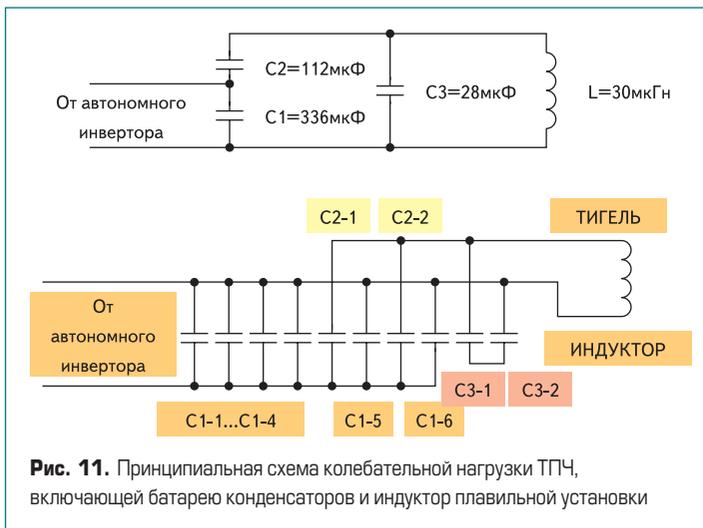


Рис. 11. Принципиальная схема колебательной нагрузки ТПЧ, включающей батарею конденсаторов и индуктор плавильной установки

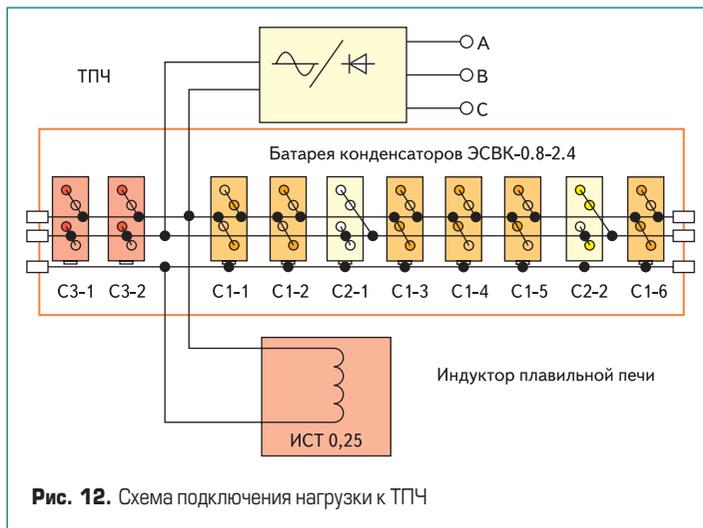


Рис. 12. Схема подключения нагрузки к ТПЧ

Эффективное использование ТПЧ в плавильной установке вместо электромашинного генератора может потребовать другого индуктора, изменяются параметры компенсирующих конденсаторов, конструктивное исполнение гибких токоподводов и силовых шинопроводов. Это связано прежде всего с пониженным, относительно электромашинных генераторов, выходным напряжением ТПЧ. Производительность индукционной электропечи обеспечивается повышением тока индуктора.

На промышленных предприятиях в плавильных установках до настоящего времени используются электромашинные генераторы ТВЧ, хотя количество их мало в сравнении со статическими источниками электропитания. Надежность отечественных электромашинных генераторов для установок индукционного нагрева была недостаточной. На промышленных предприятиях нормой считался 100%-ный резерв электромашинных источников электропитания установок ТВЧ.

Зарубежные электромашинные генераторы обладали лучшими техническими характеристиками, но они были недоступны для отечественных промышленных предприятий. Поэтому, как только электротехническая промышленность около 40 лет тому назад освоила выпуск силовых полупроводников — тиристоров, диодов и мощных транзисторов, многие организации начали интенсивную разработку статических источников электропитания ТВЧ для установок индукционного нагрева и плавки металлов.

На электротермических участках промышленных предприятий одно время широкое распространение получили установки ТВЧ (66–400 кГц) с ламповыми генераторами. Однако ограниченный ресурс электровакуумных ламп, низкий КПД установок ТВЧ, созданных на их основе, привели к разработке тиристорных и транзисторных преобразователей частоты.

Индукционная плавка металлов в порционных электропечах требует от статического источника электропитания специальных возможностей — прежде всего большого диапазона изменения выходной мощности с сохранением высокого КПД, при значительном изменении эквивалентных параметров нагрузки.

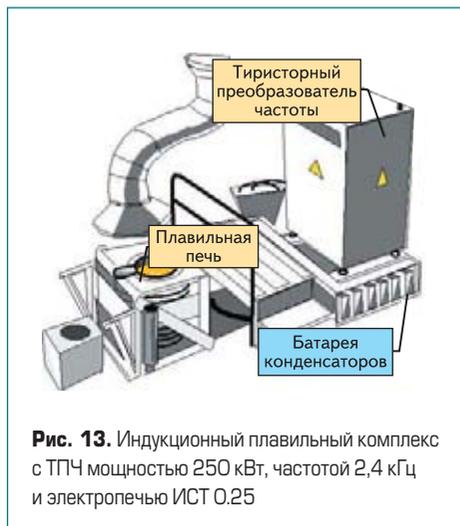


Рис. 13. Индукционный плавильный комплекс с ТПЧ мощностью 250 кВт, частотой 2,4 кГц и электропечью ИСТ 0.25

Вскоре порционная плавка металлов от статических источников ТВЧ стала альтернативой индукционной плавке с использованием электромашинных генераторов. Электротермические индукционные печи, в отличие от источников ТВЧ и печных конденсаторов, практически не изменились с момента их создания.

Индукционный комплекс для открытой плавки металлов, выполненный по результатам проведенных исследований, показан на рис. 13. Размещение ТПЧ в непосредственной близости от индукционной печи снижает потери на передачу ВЧ-энергии и позволяет уменьшить основной недостаток рассмотренной схемы тиристорного инвертора — пониженное выходное напряжение, в сравнении с мостовой схемой или машинным генератором.

В таблице 2 приведены технические характеристики плавильного комплекса с индукционной электропечью, рассчитанной на 250 кг черного металла, при проектировании комплекса использованы описанные приемы схематехнического моделирования.

Таблица 2. Технические характеристики плавильного комплекса с индукционной электропечью

Время плавки (холодной/горячей) печи	60/45 мин
Частота рабочая ТВЧ	2,4...8,0 кГц
Выходное напряжение	до 400 В
Потребляемая электрическая мощность	до 250 кВт
Реактивная мощность конденсаторов	2500 кВАр

В процессе форсированного нагрева плавильной печи статический источник питания поддерживает максимальную мощность, соответствующую $\cos\varphi = 1$. Это соответствует представлению в модели ТПЧ колебательной нагрузки омическим сопротивлением.

Стабилизация мощности при плавке осуществляется системой управления путем воздействия на рабочую частоту ТПЧ. В этом случае нагрузку следует представлять резонансным колебательным контуром.

Внимание к деталям конструктивного выполнения и обслуживания плавильных установок обусловлено необходимостью учета человеческого фактора, существенно влияющего на надежность работы силового оборудования ТВЧ. Квалификация обслуживающего персонала электротермического оборудования снижается, эту тенденцию также необходимо учитывать.

Определяющими показателями для плавильных электропечей являются следующие; стоимость, количество плавов в тигле, ремонтпригодность, периодичность и объем профилактических работ; безопасность обслуживания, требования к квалификации обслуживающего персонала.

Исключение ВЧ-контакторов и упрощение конструктивного выполнения токоподводящих шин при применении ТПЧ вместо электромашинных генераторов значительно повышает надежность плавильных установок.

Таблица 3. Статистика причин отказов плавильных установок ТВЧ, находящихся в промышленной эксплуатации

Причина отказа	Доля
Ошибки технического персонала	60%
Неисправности ТПЧ	5%
Неисправности в электропечах	20%
Неисправности в батарее конденсаторов	10%
Другие отказы	5%

В качестве обоснования детального рассмотрения конденсаторной батареи и плавильной электропечи как нагрузки ТПЧ, не претендуя на обобщения, в табл. 3. приведем нашу статистику причин отказов плавильных установок ТВЧ, находящихся в промышленной эксплуатации.

Заключение

1. В схематехнической модели инверторно-индукторного комплекса можно представить резонансную нагрузку омическим сопротивлением. При этом эквивалентное омическое сопротивление колебательной нагрузки определяется равенством входного тока ТПЧ на частоте резонанса.
2. Особенностью электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе частоты является обратное влияние колебательной нагрузки. Схематехническая модель ТПЧ, в отличие от физической модели, позволяет выделить доминанту последствий изменений параметров нагрузки автономного инвертора.
3. Предложена PSpice-модель индуктора — как индуктивной катушки с заданным числом витков и нелинейным ферромагнитным сердечником.

Литература

1. Златин И. Новые возможности программы схематехнического моделирования Micro-Cap // Компоненты и технологии. 2007. № 10.
2. Валиуллина З., Зинин Ю. Схематехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
3. Болотовский Ю. И., Гутин Л. И., Таназлы Г. И., Шуляк А. А. Измерение параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным // Силовая электроника. 2005. № 1.
4. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несимметричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.
5. Шамов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л.: Машиностроение, 1974.
6. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974.