

Проектирование тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса

с выходным трансформатором

Зульфия Валиуллина

valiullina_ela@mail.ru

Юрий Зинин

umz42@mail.ru

Установки индукционного нагрева металлов являются энергоемкими, но не самыми дорогими электротехническими устройствами. Средняя стоимость комплекса индукционного нагрева токами повышенной частоты (ТВЧ) составляет 5000 руб. (\$200) на 1 кВт установленной мощности. Для сравнения — средняя капитализация оборудования РАО «ЕЭС» составляет около \$500 на 1 кВт (в Европе вдвое больше).

Цель статьи — описание этапов проектирования элементов установок ТВЧ-нагрева с применением схемотехнического моделирования. Эта статья обзорного характера, в ней изложены, в основном, методологические принципы проектирования элементов тиристорного инверторно-индукторного закалочного комплекса, показаны приоритеты разработчика, а также приведены наиболее значимые этапы процесса проектирования элементов инверторно-индукторного комплекса для индукционной закалки.

Для закалки штучных изделий используется, как правило, одновитковый индуктор с частотой тока от 4 до 22 кГц. Индуктор подключают к выходу тиристорного инвертора, в этом случае используют закалочный трансформатор специальной конструкции и высокочастотные силовые конденсаторы, согласующие комплексное сопротивление нагруженного индуктора с выходным сопротивлением автономного инвертора. Эти элементы работают в условиях несинусоидальных токов и напряжений, выполняя ряд основных функций и, кроме этого, — гальваническую развязку от высоковольтных цепей высокочастотной установки.

На рис. 1 показана схемотехническая Micro-Cap-модель высокочастотного тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ) мощностью 40 кВт, частотой

20 кГц с закалочным трансформатором и нагрузочным колебательным контуром [1].

Авторы избегают использования математических выражений, акцентируя внимание на поиске решения технической задачи методами схемотехнического моделирования, получившими широкое распространение в среде разработчиков силовой электроники. С другой стороны, следует отметить, что преувеличенные ожидания по поводу возможностей PSpice-моделирования не имеют оснований. Вполне возможно уточнить параметры электрической схемы за короткое время. Но даже для этого требуются знания предметной области, которые приобретаются в течение длительного времени (нескольких лет).

Тиристорным преобразователем частоты в установках индукционного нагрева металлов называем устройство силовой электроники, состоящее из источника постоянного тока (выпрямителя) и автономного инвертора с однофазным выходом, выполненное на силовых управляемых полупроводниковых приборах — тиристорах. Стоимость комплекта силовых полупроводниковых элементов для ТПЧ-тиристорных и диодов сравнима со стоимостью комплекта высокочастотных конденсаторов. Стоимость высокочастотного трансформатора, рассчитанного на передачу полной реактивной мощности от компенсирующего конденсатора к закалочному индуктору, в свою очередь, сравнима со стоимостью ТПЧ. Поэтому необходимо проектирование либо обоснованный выбор закалочного трансформатора.

Исходными данными при проектировании ТПЧ являются требования технического задания на разработку электротермического комплекса.

Частота тока индуктора определяется из теплового расчета технологического процесса закалки. При расчете задается глубина закалки, температура поверхности и температура на глубине закалки, которая в среднем принимается равной 750 °С. В приближенных расчетах глубины проникновения тока в металл используются усредненные характеристики стали.

В результате расчета получаем удельную мощность на поверхности детали, полную мощность и время нагрева ТВЧ, которые характеризуют режим индукторного нагрева.

Если деталь имеет большие габариты, то полная мощность может иметь неоправданно большую величину. В этом случае деталь разбивают на равные

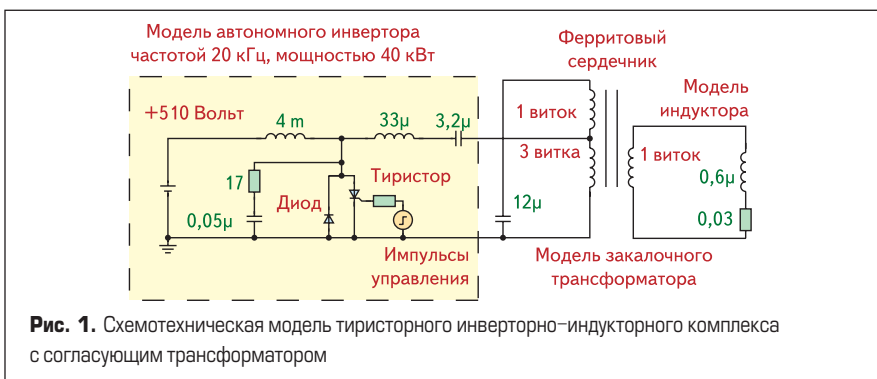


Рис. 1. Схемотехническая модель тиристорного инверторно-индукторного комплекса с согласующим трансформатором

поверхности и подсчитывают мощность, необходимую для закалки одного участка. Затем сдвигают индуктор либо деталь, последовательно охватывая всю поверхность. В результате определяется производительность установки.

Если деталь цилиндрическая, то минимально необходимая мощность источника ТВЧ обеспечивает закалку участка, равного ширине индуктора, по длине закаливаемой полосы, равной длине окружности.

Определение основных параметров комплекса

Для определенности принимаем, что необходима глубина закаленного слоя 3,0 мм, наружный диаметр детали — 40 мм, материал — сталь 45. Определяем температуру поверхности — 900 °С, рабочую частоту — 20 кГц.

Учитывая технические данные подобных закалочных установок, задаем ширину индуктора равной 2 см, тогда мощность, необходимая для одновременного нагрева участка детали, равна 30 кВт. Если учесть типовые значения КПД трансформатора и индуктора, то требуется выходная мощность тиристорного автономного инвертора равная 40 кВт.

Напряжение питания автономного инвертора U_d равно 510 В, так как мощные преобразователи всегда подключаются к промышленной сети переменного тока через трехфазный мостовой выпрямитель.

Номинальная величина выходного напряжения автономного инвертора интересуют разработчика комплекса только при использовании типового закалочного трансформатора, выпускаемого серийно.

При проектировании автономного инвертора в первую очередь определяются параметры коммутирующих элементов — C_k и L_k . По табл. 1 предварительно находим их для автономных инверторов различной мощности и частоты.

Таблица 1

4 кГц		8 кГц		18 кГц	
C_v , мкФ	L_v , мкГн	C_v , мкФ	L_v , мкГн	C_v , мкФ	L_v , мкГн
15	188	7,50	94	3,32	42
7,10	395	3,60	198	1,58	88

Затем составляется упрощенная схемотехническая модель тиристорного инвертора или, в профессиональной версии, выполняется полная схема ТПЧ, и путем изменения параметров коммутирующих элементов формируются его необходимые характеристики. На этом этапе нагрузку автономного инвертора целесообразно представить активным эквивалентным сопротивлением, найденным из условия обеспечения расчетного значения выходной мощности.

При определении параметров конденсаторов всегда учитываем номинальный ряд стандартных значений емкости.

Выходной ток инвертора формируется током тиристора и диода (рис. 2), при обязательном наличии интервала паузы, во время которой восстанавливается напряжение на коммутирующем конденсаторе инвертора.



Рис. 2. Временные диаграммы тока полупроводниковых элементов автономного инвертора

Далее рассмотрим особенности проектирования брезонансного высокочастотного инвертора с обратными диодами, позволяющие, в основном, моделировать режимы нагрузки и напряжений на полупроводниковых элементах и конденсаторах в ходе схемотехнического моделирования с колебательным нагрузочным контуром. Брезонансным автономный инвертор называется потому, что он отдает мощность резонансному контуру нагрузки на второй гармонике выходного тока.

Номинальное выходное напряжение $U_{вых}$ для несимметричной одноячейковой схемы автономного инвертора с удвоением частоты (рис. 1) равно $U_d/2$, то есть 250 В.

Инвертор работает в режиме источника тока, поэтому на его входе необходим дроссель постоянного тока. Индуктивность дросселя фильтра со стальным сердечником (самого теплонапряженного, тяжелого и габаритного элемента) для автономного тиристорного инвертора определяется равной 3–4 мГн. Это величина типового исполнения силового дросселя постоянного тока с величиной воздушного зазора 1–4 см [1].

На рис. 2 приведена кривая, характеризующая выходной ток инвертора. Эта кривая составлена из тока тиристора и тока диода, сдвинутых вниз на величину постоянной составляющей входного тока автономного инвертора. Увеличение входного тока обусловлено возрастанием активного сопротивления нагрузки и пропорционально этому сопротивлению. При этом уменьшается ток диода и длительность его протекания. Работоспособное состояние автономного инвертора характеризуется

существованием резонансного режима, при котором обеспечивается необходимая длительность интервала протекания тока через обратный диод. Этот интервал обеспечивает коммутационную устойчивость автономного инвертора по времени восстановления тиристора [2]. Другие динамические воздействия на тиристоры в рабочих режимах не ограничивают выходную частоту этой схемы автономного инвертора.

По данной схеме разработаны унифицированные автономные инверторы частотой от 1000 Гц мощностью 250 кВт до 20 кГц мощностью 63 кВт, одинакового конструктивного исполнения.

На рис. 3 показана кривая напряжения на вентильном комплекте высокочастотного автономного инвертора. При оптимальном соотношении интервала времени проводящего состояния вентильного комплекта по отношению к периоду включения тиристора, равном 2/3, амплитуда прямого напряжения на тиристоре максимальна для номинального режима и достигает 2250 В. Следовательно, в реальной схеме необходимо применение двух последовательных тиристоров и диодов. В схемотехнической модели нами установлен параметр максимально допустимого напряжения на тиристоре — 5 кВ [3].

Типовая конструкция вентильного комплекта ТПЧ показана на рис. 4. В схеме используются четыре таблеточных быстродействующих тиристора ТБ143-400-11-433 и частотные диоды штыревой конструкции ДЧ151-100Х-12-2 штыревого исполнения с временем восстановления не более 5,0 мс.

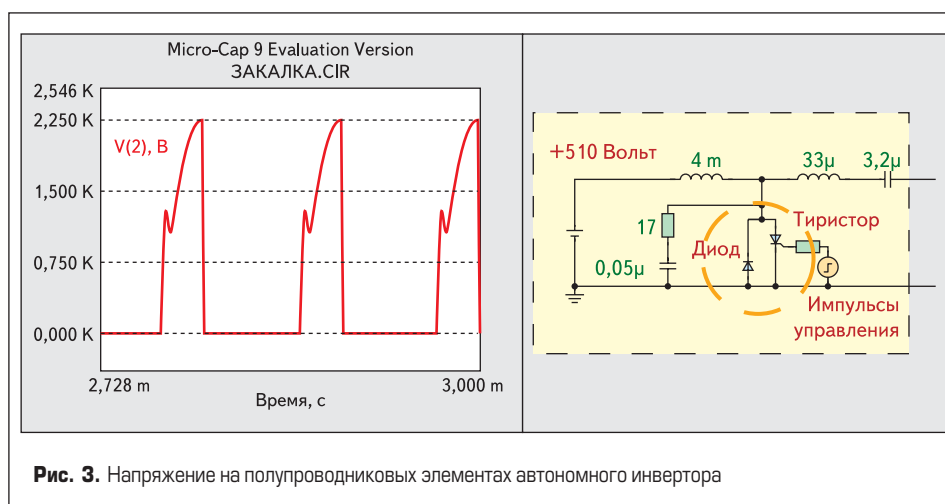


Рис. 3. Напряжение на полупроводниковых элементах автономного инвертора

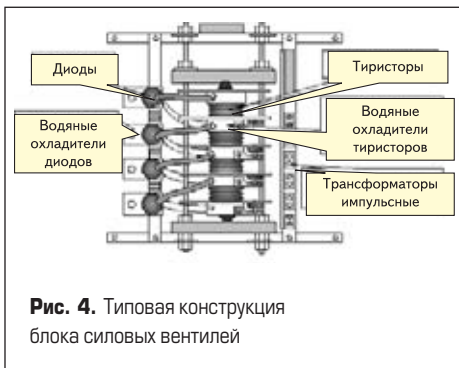


Рис. 4. Типовая конструкция блока силовых вентилей

Четыре последовательных тиристора в инверторе обеспечивают надежную работу ТПЧ с необходимым запасом по напряжению для пусковых и переходных режимов.

Тиристоры применяются в силовых преобразовательных устройствах с 1960-х годов. Вольт-амперная характеристика полупроводниковых приборов — тиристоров и диодов, предельные динамические параметры du/dt , di/dt и время восстановления напряжения кремниевой структуры, а также другие эксплуатационные параметры — термодиклличность, тепловое сопротивление хорошо сочетаются с преобразуемой мощностью [4].

Улучшение динамических характеристик отечественных тиристоров, применяемых в инверторно-индукторных комплексах, исключает многие существовавшие ограничения. Верхняя граница рабочей частоты рассматриваемого автономного инвертора определяется, в основном, временем восстановления управляемости тиристоров, которое, однако, незначительно увеличивается из-за небольшой величины обратного напряжения. Величина обратного напряжения на тиристоре составляет примерно 2 В — значение прямого напряжения в интервале проводимости тока диодом, определяемое по ВАХ, приведенной на рис. 5.

Время восстановления диода (при обрыве его обратного тока) определяет величину коммутационных перенапряжений на тиристорах.

Распределение постоянных и коммутационных напряжений на тиристорах осуществляется демпфирующими элементами — ВЧ-конденсаторами и резисторами, эффективность которых проверяется в ходе схемотехнического моделирования.

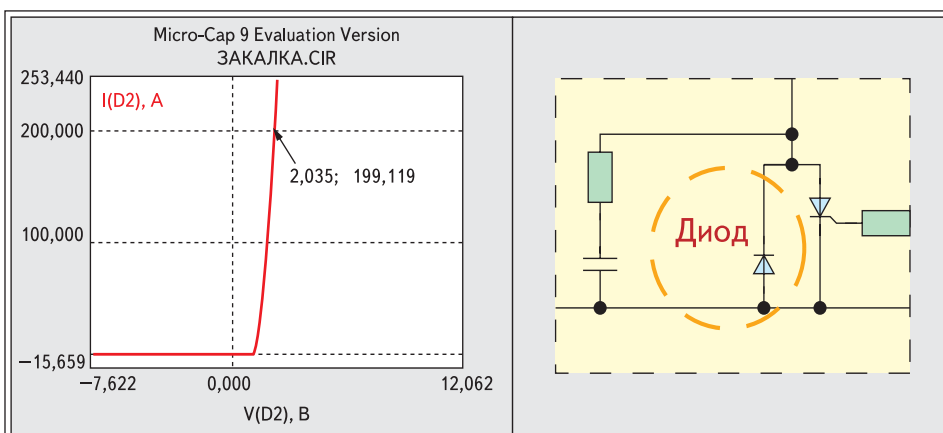


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика обратного диода

Проектирование нагрузки и закалочного трансформатора

После определения номинальных параметров схемотехнической модели автономного инвертора в режиме нагрузки активным сопротивлением переходим к проектированию резонансной нагрузки, которая реально включает следующие компоненты: силовой высокочастотный кабель, или шинопровод, закалочный трансформатор, конденсаторную батарею и индуктор. Исключаем из рассмотрения важные в практике конструирования высокочастотных силовых установок вопросы проектирования шинопроводов, так как они не находят отражения при схемотехническом моделировании. В случае необходимости можно учесть активное сопротивление шин и их индуктивность.

В высокочастотных установках для закалки стальных изделий, как правило, необходимо применение высокочастотных трансформаторов с ферритовым (18–22 кГц) или «стальным» (до 8 кГц) сердечником. Стандартные закалочные трансформаторы, выпускаемые серийно для установок индукционного нагрева, выполняются со стальным сердечником, выполненным из электротехнической ленты. Трансформаторы обычно имеют 4 секции по 6 витков первичной обмотки и расположенные между ними одновитковые секции (блины) вторичной обмотки. Закалочные трансформаторы применяются с индукторами, имеющими небольшое число (1–3) витков. Коэффициент трансформации меняется в широких пределах переключением витков первичной обмотки.

Трансформатор промышленного исполнения должен использоваться на частоте, соответствующей номинальной частоте, указанной в паспорте изделия. Допускается использование трансформатора на частоте выше номинальной, например, трансформатор на 2400 Гц можно использовать на частоте 8000 Гц, но не наоборот. Ограничением повышения рабочей частоты являются потери в сердечнике.

Сердечник промышленных закалочных трансформаторов выполняется из качественной холоднокатаной электротехнической стали Э3425 толщиной 0,08 мм, что позволяет сократить в нем потери.

В обозначении типа трансформатора указывается номинальная реактивная мощность $Q_{тр}$ кВА. Учитывая, что коэффициент мощности «нагруженный» индуктор, не превышает $\cos \phi = 0,2$, активная мощность трансформатора равна: $P = Q_{тр} \times \cos \phi$.

С учетом влияния нагруженного индуктора при изменении магнитных свойств металла, когда температура превышает точку Кюри, при выходной мощности тиристорного инвертора, равной 40 кВт, требуется трансформатор с $Q_{тр} = 200$ кВА.

При расчете основных параметров трансформатора (сечение и объем магнитопровода, число витков первичной и вторичной обмоток) считается, что трансформатор не будет эксплуатироваться в режиме холостого хода, то есть с неподключенным индуктором. При отсутствии (или недостаточности) нагрузки трансформатор неминуемо перейдет в режим насыщения магнитной системы, перегреется и сгорит.

После выбора необходимого для настройки преобразователя коэффициента трансформации (определяется частотой, выходным напряжением, числом витков и размерами индуктора) необходимо включить в работу все секции первичной обмотки. При этом следует использовать все первичные секции трансформатора. Распределение выводов по секциям, количество витков первичной обмотки может изменяться.

Иногда применяется автотрансформаторная схема включения закалочного трансформатора, в которой можно уменьшить напряжение на вторичной обмотке закалочного трансформатора до номинальной величины для индуктора, повысить напряжение на конденсаторе компенсирующей батареи и одновременно обеспечить номинальную величину выходного напряжения тиристорного инвертора.

Выход преобразователя подключен к выводу первичной обмотки, а компенсирующий конденсатор подключен к полному числу витков обмотки, как это показано на рис. 1.

Известны разработки высокочастотных тиристорных преобразователей частоты без закалочного трансформатора, но они имеют следующие недостатки:

- индуктор в них должен быть многovitковым;
- при замене индуктора требуется существенная перенастройка ТПЧ;
- индуктор нельзя заземлять, поэтому возникают трудности с обеспечением правил техники безопасности при обслуживании установки.

Необходимость компенсации низкого коэффициента мощности индуктора, доведение его до приемлемого уровня, близкого к единице, требует применения параллельных конденсаторов, реактивная мощность которых пропорциональна квадрату рабочего напряжения. Конденсаторы электротермические предназначены для работы в цепях переменного тока высокой частоты, они повышают коэффициент мощности электротермических установок. Важным эксплуатационным параметром электротермических (печных) конденсаторов является реактивная мощность — Q_c .

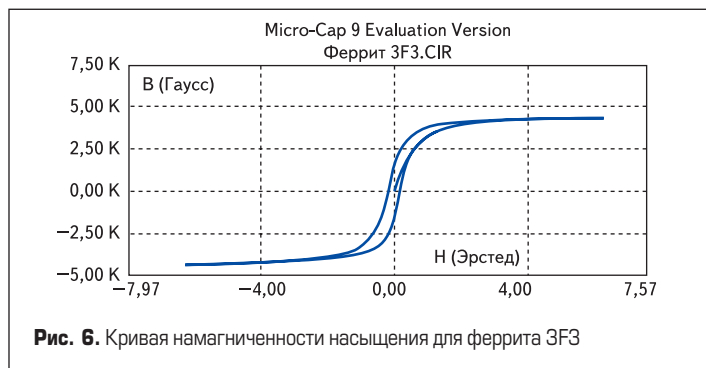


Рис. 6. Кривая намагнитченности насыщения для феррита 3F3

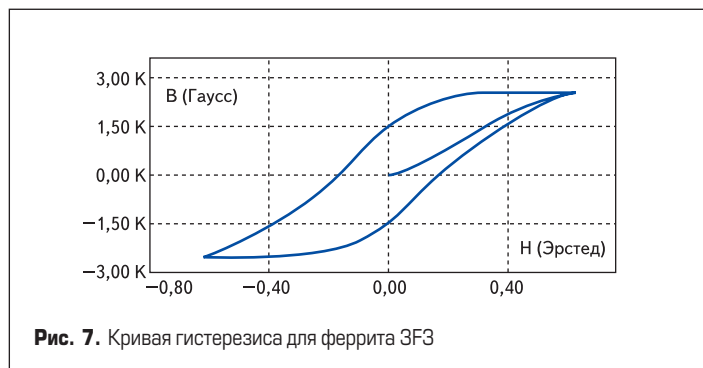


Рис. 7. Кривая гистерезиса для феррита 3F3

Чтобы увеличить напряжение компенсирующих конденсаторов и согласовать выходное сопротивление автономного инвертора с сопротивлением нагруженного индуктора, согласующий высокочастотный закалочный трансформатор выполняют с расчетом на полную реактивную мощность. Закалочный трансформатор обеспечивает циркуляцию (обмен) реактивной мощности от конденсатора к индуктору и часто является уникальным электротехническим изделием инверторно-индукторных комплексов индукционного нагрева для пайки и закалки.

Закалочный трансформатор работает в условиях, близких к короткому замыканию. В нем, как и в трансформаторе тока, исключен режим холостого хода, поэтому сечение сердечника небольшое по сравнению с трансформатором напряжения.

Связь между обмотками закалочного трансформатора в основном осуществляется за счет взаимной индуктивности первичных и вторичных секций. Следовательно, конструкция закалочного трансформатора значительно отличается от конструкции обычного трансформатора.

К сожалению, модель магнитного сердечника в Micro-Cap не зависит от изменения частоты. Потери в магнитном материале сердечника определяются только для частоты, для которой создана модель. На других частотах будет наблюдаться значительная погрешность с ошибкой в несколько раз. Отметим, что это проблема не Micro-Cap, а PSpice модели.

Трансформатор может включаться по непосредственной схеме компенсации — прямое включение между индуктором, компенсирующими конденсаторами и выходом автономного инвертора.

В высокочастотных (16–22 кГц) автономных инверторах мощностью не выше 63 кВт в качестве коммутирующего конденсатора может применяться блок конденсаторов типа К78-21А. Номинальное напряжение 800 В, наиболее распространенная емкость — 2,5 мкф. Конденсаторы электротермические используются в качестве коммутирующих конденсаторов и в компенсирующих батареях для преобразователей значительной мощности на частоте не выше 22 кГц.

Затем проектируем закалочный трансформатор и выбираем конденсаторную батарею.

Трансформатор закалочный служит для согласования источника тока повышенной частоты с индуктором.

Закалочные индукторы изготавливаются в комплекте с закалочным трансформатором. Индукторы для закалки изделий индивиду-

альны по геометрии, часто уникальны по конструкции и требуют эмпирического подхода. Индукторы являются наиболее часто обновляемыми элементами инверторно-индукторных комплексов, срок службы которых в целом составляет для отечественных условий эксплуатации десятки лет.

Из сказанного следует, что работу закалочного трансформатора, конденсаторной батареи и индуктора следует рассматривать совместно.

Так как промышленные трансформаторы выполняются на частоты не выше 8 кГц, ставим задачу проектирования трансформатора с ферритовым сердечником. Выбираем конструктивное выполнение феррита в виде брусков размером 20 × 15 × 120 мм, из которых выполняется Ш-образный сердечник трансформатора.

Выбираем материал сердечника — феррит 3F3. Частотный диапазон — до 500 кГц. Амплитудная магнитная проницаемость при 25 кГц, 200 мТл и 100 °С — 4000 ± 25%.

Потери мощности при 25 кГц, 200 мТл и 100 °С составляют 90 кВт/м³.

Свойства ферромагнитных материалов характеризуются зависимостью В (Н) магнитной индукции от напряженности магнитного поля. При этом различают кривые намагничивания, представляющие собой однозначные зависимости и неоднозначные зависимости — петли гистерезиса (от греч. hysteresis — запаздывание).

Предельной характеристикой ферромагнетика является намагнитченность насыщения; она достигается в поле, при котором ветвь кривой намагничивания приобретает горизонтальный характер.

Кривые намагничивания магнитных материалов зависят не только от физических свойств материалов и температуры, но и от последовательности прохождения магнитных состояний. Рассматривают несколько видов кривых намагничивания, в частности, кривые первоначального намагничивания, которые получают при

монотонном увеличении напряженности Н из начального состояния с В = Н = 0.

В последней версии Micro-Cap-9 усовершенствован алгоритм расчета ферромагнитных сердечников и взаимосвязанных индуктивностей при неполной связи между обмотками. Нами в программе использован способ представления трансформатора при схемотехническом моделировании в виде связанных сердечником заданного размера и с определенным зором нескольких индуктивных обмоток с заданным количеством витков.

Такая модель из трех возможных способов представления трансформатора в электрических схемах Micro-Cap соответствует практике конструирования и поэтому удобна разработчику.

На рис. 6 показана кривая намагнитченности, полученная нами для нелинейной модели сердечника из феррита марки 3F3.

Кривые циклического перемагничивания (или статические петли гистерезиса) — зависимости В (Н) получают после многократного прохождения определенного интервала значений Н в прямом и обратном направлениях. На рис. 7 показана полученная нами путем схемотехнического моделирования трансформатора кривая гистерезиса феррита, отражающая величину его потерь.

Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше потери на перемагничивание материала. При достижении температурой точки Кюри происходит потеря магнитных свойств сердечника.

Практически нас интересует характер коммутационных кривых — геометрическое место вершин симметричных петель перемагничивания. Такая зависимость В от Н, приведенная на рис. 7, иллюстрируется расчетом магнитной модели Джилса – Атертона для сердечника из 3F3 феррита, показанной на рис. 8.

Моделированием определены число витков обмоток трансформатора и коэффициент связи между ними, приведенные в табл. 2.

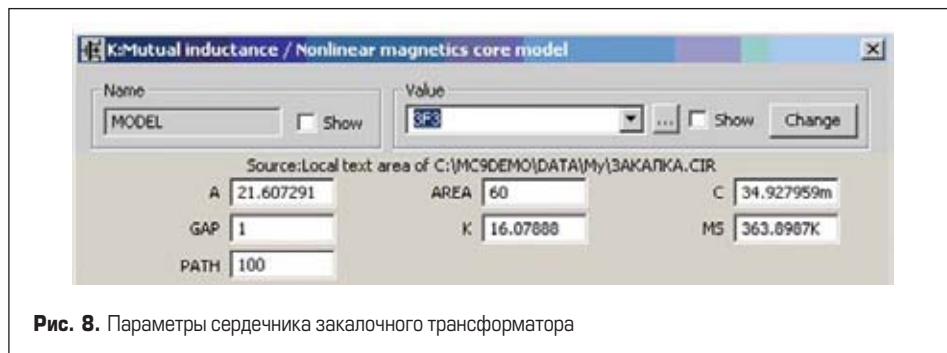


Рис. 8. Параметры сердечника закалочного трансформатора

Таблица 2

Первичные витки	3 + 1
Вторичные витки	1
Coupling	0,8

Путем инициализации и оптимизации расчетной модели в Micro-Cap определены следующие параметры магнитного сердечника: MS — намагниченность насыщения, Alpha — параметр магнитной связи доменов, A — параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания, C — постоянная упругого смещения доменных границ, K — постоянная подвижности доменов.

Указанные геометрические параметры сердечника трансформатора — Area (площадь), Path (длина магнитной линии) и Gap (зазор) — определены для применения трансформатора в конкретной схеме высокочастотного автономного несимметричного инвертора.

Первичная и вторичная обмотки трансформатора для обеспечения меньшей индуктивности рассеяния должны быть конструктивно вложены друг в друга.

Модель магнитного сердечника в Micro-Cap частотнонезависимая. Потери в магнитном материале и рассеиваемая мощность определяются только для той частоты, для которой построена модель. А на других частотах будет значительная ошибка (в несколько раз). Справедливости ради надо отметить, что это проблема не Micro-Cap, а модели. И такая же ошибка будет при расчете PSpice модели во всех программах схемотехнического моделирования.

Таким образом, ограничение рабочей частоты установок индукторного нагрева обусловлено не только частотными свойствами тиристоров, но и понижением КПД закалочных трансформаторов на высоких частотах.

Результаты моделирования зависимости магнитной индукции B (Тесла) от изменения напряженности магнитного поля (Эрстед) для проектируемого закалочного трансформатора приведены на рис. 9.

Полученные результаты позволяют определить потери в модели на рабочей частоте инверторно-индукторного комплекса.

Конденсаторная батарея

Для расчета собственной резонансной частоты контура нагрузки или расчета индуктивности индуктора необходимо, чтобы резонансная частота находилась в пределах рабочего

диапазона инвертора. Нам необходимо определить емкость C_n и индуктивность L_n .

По величине присоединенной реактивной мощности кВА рассчитывается емкость конденсатора. Из обеспечения резонансной частоты контура нагрузки определяется ее индуктивность, а затем рассчитывается индуктор.

Явление резонанса токов, используемого при индукционном нагреве, сложнее резонанса напряжения.

Признаки резонанса токов:

- сопротивление контура максимальное и чисто активное;
- ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением источника и достигает минимального значения;
- реактивная составляющая тока в индукторе равна емкостному току компенсирующего конденсатора, причем эти токи значительно превышают выходной ток автономного инвертора.

Токи величиной в несколько тысяч ампер, протекающие в нагрузочном колебательном контуре, предъявляют особые требования к шинпроводам и компенсирующей конденсаторной батарее инверторно-индукторного комплекса.

Индуктор для поверхностной закалки изделий преобразует электрическую энергию повышенной частоты в тепловую.

Особенностью индукторов для закалки деталей является малое число витков, что требует согласования параметров генератора и индуктора, применения понижающего трансформатора. В закалочных установках иногда применяются индукторы с отверстиями, через которые подается вода для охлаждения деталей.

Требуемый для закалки «настил» мощности — величина индуктированного тока на нагреваемой поверхности с целью обеспечения высокой скорости нагрева — вынуждает использовать одно- или маловитковые индукторы. Такие индукторы обладают небольшой индуктивностью и сопротивлением.

Нами при моделировании принята величина активного сопротивления индуктора 0,03 Ом и его индуктивность 0,6 Ом, которые соответствуют величине входной мощности автономного инвертора в 40 кВт, при использовании согласующего трансформатора (3+1)/1 и компенсирующего конденсатора.

В цепях нагрузки большой мощности требуется тщательная разработка конструкции индуктора. Нужно обеспечить связь индукто-

ра с нагреваемой деталью, а также необходимую величину тока индуктора. Требуется получить нужную скорость нагрева.

Известны достаточно простые расчеты индукторов. Удельная мощность, передаваемая в нагрузку ТПЧ, определяется квадратом напряжения индуктора. Увеличение частоты рабочего тока приводит к уменьшению удельной мощности индуктора, но возрастание активного и реактивного сопротивления индуктора с ростом частоты компенсирует этот фактор.

Нужно определить мощность и время, необходимые для нагрева детали на заданную глубину при определенной температуре поверхности. Вначале выполняется тепловой расчет, в результате которого получаем удельную мощность, полную мощность и время нагрева. Затем определяем геометрические размеры индуктора (длину, толщину внутренней стенки, внутренний диаметр), его активное, реактивное и полное сопротивление, ток в индукторе и напряжение на нем.

Электрический расчет индуктора достаточно провести приближенно, так как даже небольшое изменение рабочей частоты инвертора существенно изменяет характеристики индуктора.

Каждая электротермическая установка согласуется на один индуктор, определяющий ее мощность. Использование разных индукторов подразумевает перенастройку параметров колебательного контура для согласования с нагрузкой. В противном случае неизбежны потери мощности и уменьшение КПД.

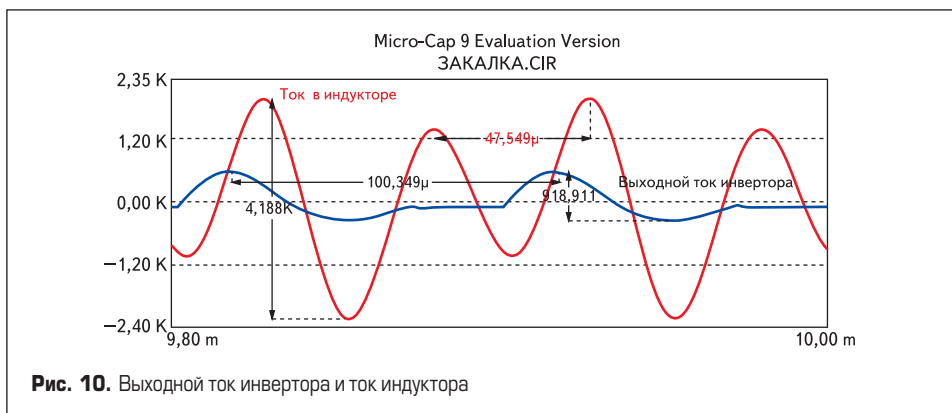
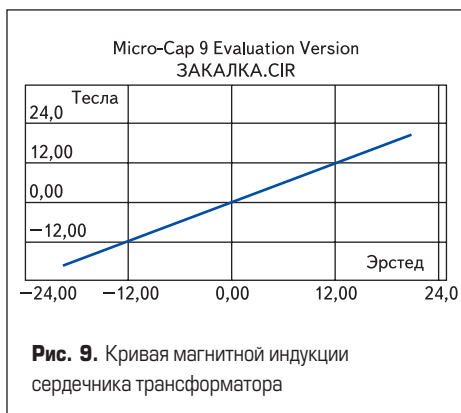
Для уменьшения нагрева металлических конструкций, попадающих в зону работы индуктора, от полей рассеяния может применяться электромагнитное экранирование пакетами электротехнической стали.

При нагреве тонких деталей сложной формы, когда требуется закалить небольшой слой детали, применяются фасонные индукторы. Многослойные индукторы допускают непосредственное подключение к инверторно-индукционной системе.

Зазор между индуктором и деталью должен быть небольшим — 2–3 мм.

В результате электрического расчета цилиндрического индуктора определяем глубину нагреваемого слоя, которая должна быть значительно меньше диаметра изделия, подлежащего закалке.

На рис. 10 приведены графики выходного тока инвертора и тока в индукторе. Амплитуда



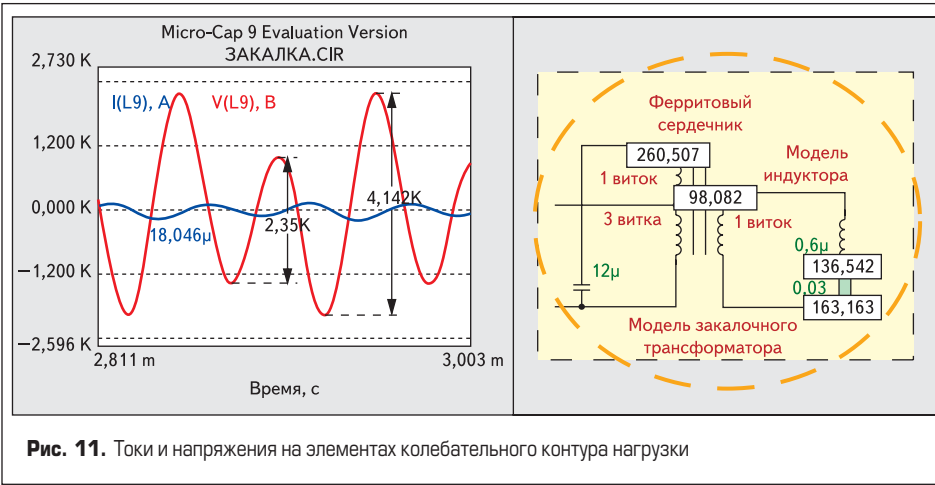


Рис. 11. Токи и напряжения на элементах колебательного контура нагрузки

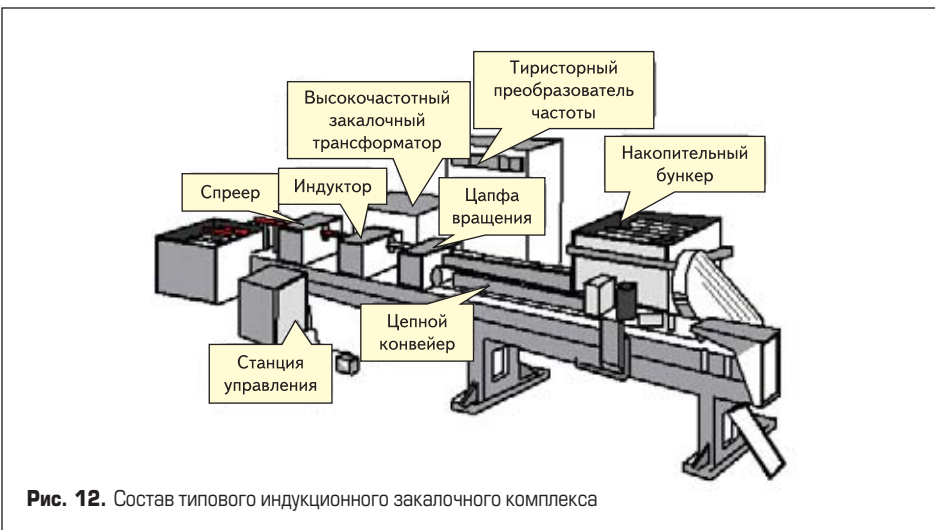


Рис. 12. Состав типового индукционного закалочного комплекса

тока индуктора значительно превышает величину выходного тока автономного инвертора.

Частота тока индуктора в два раза превышает частоту выходного тока автономного инвертора. Отношение амплитуд первого и второго периода вынужденных колебаний индуктора характеризует значительное вносимое сопротивление в резонансный контур нагрузки. По декременту затухания этой кривой определяется добротность контура нагрузки [5, 6].

Напряжения узлов электрической схемы нагрузки показаны на рис. 11 справа, слева на панели Micro-Cap показаны кривые тока и напряжения индуктора, которые свидетельствуют о его неполной компенсации индуктивного сопротивления.

Увеличением рабочей частоты относительно рассмотренной настройки режима схемотехнической модели бирезонансного тиристорного инвертора можно повысить его выходную мощность.

Инверторно-индукторные закалочные комплексы

Аналогами технологического процесса индукционной закалки являются объемная закалка изделий (например, ножовочных полотен) в закалочной жидкости или нагрев изделий в электрических, либо газовых печах с последующим погружением в масло или воду. Однако эти процессы длительные, неэкономные, грязные и опасные для персонала. Индукционная закалка лишена этих недостатков.

Типовые изделия для индукционной закалки — буровые штанги, оси и другие длинномерные цилиндрические детали, например валки прокатных станов, инструмент и другие изделия.

Шестерни могут закаливаться в кольцевых индукторах. Закалка зубьев колесных пар большого модуля производится по одному. Охлаждение нагретых деталей производится в ванне с закалочной жидкостью. Возможно применение спреера, при этом происходит одновременный нагрев и закалка.

При закалке небольших шестерен в кольцевом индукторе требуется выбор оптимальной рабочей частоты. При частоте выше номинальной происходит перегрев зуба, а при пониженной частоте — перегрев впадины.

Реже используется закалка примыкающими индукторами. Примыкающие индукторы могут выполняться в виде профильной конструкции по форме обрабатываемой поверхности. При этом возможно применение концентраторов магнитного поля, повышающих эффективность нагрева, особенно внутренних поверхностей.

Оборудование закалочных установок, как правило, размещается на металлообрабатывающих станках, приспособленных для закалки. Часто при закалке производится вращение детали и перемещение индуктора относительно обрабатываемой детали. Для этого возможно применение токарных станков, сверлильных и др. При массовом выпуске деталей целесообразным является проектирование полуавтоматической линии.

В зависимости от способа транспортировки деталей закалочный трансформатор может устанавливаться на подвижной части или на неподвижной части станка.

В комплект закалочного оборудования входит спреер (закалка деталей во время нагрева) или закалочная ванна (закалка деталей после нагрева).

На рис. 12 показан электротермический инверторно-индукторный комплекс для закалки длинномерных заготовок пальцев тракторов и танков. Особенности высокочастотного ТПЧ на основе полирезонансного автономного инвертора и выходного закалочного трансформатора с индуктором рассмотрены применительно к этому комплексу. Для конкретности изложения рассмотрен автономный инвертор, рабочая частота и мощность которого обеспечивают питание индуктора с целью непрерывно-последовательной закалки заготовок диаметром до 40 мм при производительности до 360 шт./ч.

Процесс закалки сопровождается быстрым вращением детали в цапфе, что предотвращает ее деформацию. При штучной термообработке изделий комплекс выполняется на основе токарного станка.

В закалочных установках поверхность детали (изделия) после интенсивного нагрева должна так же интенсивно охлаждаться. Устройствами для охлаждения деталей являются водяной спреер, воздушное сопло или ванна с закалочной жидкостью.

Заключительным этапом проектирования является оценка электромагнитных помех,

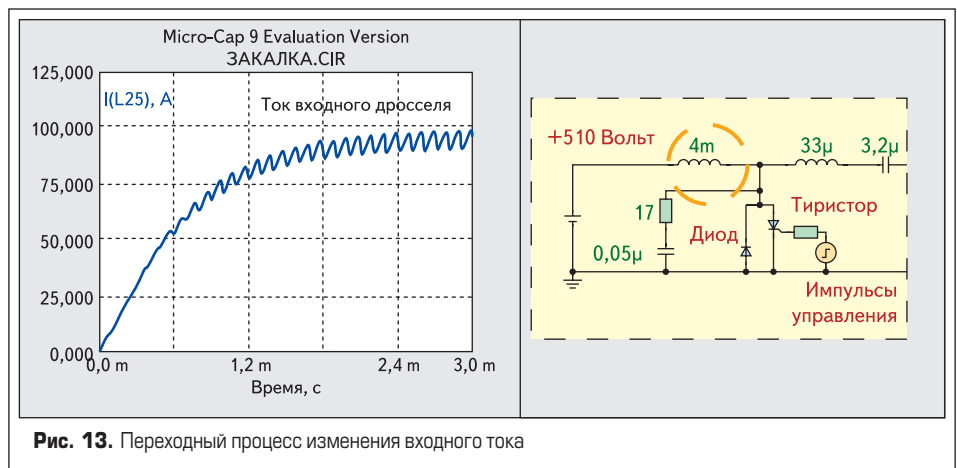


Рис. 13. Переходный процесс изменения входного тока

генерируемых в сеть ТПЧ, и оценка КПД инверторно-индукторного комплекса.

На рис. 13 показана кривая изменения входного тока, модулированная на полной мощности, в рабочем режиме, ВЧ-пульсациями тока с амплитудой около 10 А. Такая величина пульсаций является допустимой для фидера промышленного оборудования.

В модели инверторно-индукторного комплекса, выполненной в интернет-версии Micro-Cap, ограниченной количеством использованных элементов, КПД определяется как отношение выходной мощности (на индукторе) к входной мощности автономного инвертора.

Рис. 14 показывает нелинейный характер изменения мощности, обусловленный свойствами автономного инвертора и высокочастотного трансформатора. Эти составляющие можно анализировать отдельно.

Заключение

1. Основной задачей, решаемой при проектировании инверторно-индукторных закалочных установок повышенной частоты (до 22 кГц), является эффективное использование по установленной мощности полупроводниковых и коммутрующих элементов автономного инвертора, а также закалочного трансформатора.
2. Схемотехническая модель высокочастотного согласующего выходного трансформатора для автономного инвертора должна использовать магнитные параметры сердеч-

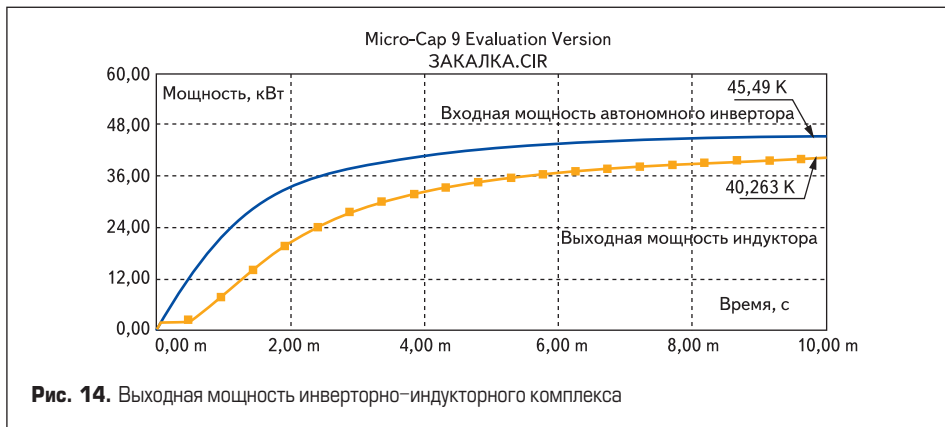


Рис. 14. Выходная мощность инверторно-индукторного комплекса

ника, соответствующие рабочей частоте закалочного трансформатора.

3. Ограничение рабочей частоты тиристорных инверторно-индукторных комплексов обусловлено не только частотными свойствами тиристорных, но и понижением КПД закалочных трансформаторов на высоких частотах.

Продолжение следует

Литература

1. Валиуллина З., Зинин Ю. Схемотехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.
2. Зинин Ю. М. Анализ интервала восстановления управляемости тиристора в несим-

метричном инверторе // Электричество. 2006. № 10.

3. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
4. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Зинин Ю. М. Методика схемотехнического моделирования и реновация резонансных инверторно-индукционных электротехнических комплексов // Вестник УГАТУ. 2005. Т. 6, № 2 (13).
6. Зинин Ю. М. Алгоритм управления многозонным индукционным нагревом от источника с ограниченной мощностью // Вестник Юж.-Ур. ГУ. 2005. № 9 (49).