

Исследование схемотехнической модели

тиристорного преобразователя частоты с вакуумной индукционной плавильной печью

В данной статье рассматриваются вопросы проектирования тиристорного преобразователя повышенной частоты, предназначенного для питания вакуумных индукционных плавильных печей. Исследования выполнены в демо-версии (Evaluation Version) программы схемотехнического моделирования Micro-Cap 9, использующей PSpice-модели силовых элементов преобразователя — тиристоры, диоды и индуктивных катушек. Результаты исследований показали возможность применения несимметричной схемы автономного инвертора в тиристорных преобразователях мощностью 60–160 кВт с выходной частотой 2–8 кГц.

Зульфия Валиуллина

valiullina_ela@mail.ru

Юрий Зинин, к. т. н.

umz42@mail.ru

Американский институт AIMMPE (American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers) составил список важнейших изобретений, способствующих прогрессу человечества, которые отбирали свыше 4 тысяч экспертов из 68 стран мира.

На первом месте оказалась периодическая система элементов Д. И. Менделеева. На втором — плавка железа египтянами, впервые произведенная за 3550 лет до н. э. На третьем месте — изобретение транзистора. Далее последовательно — изобретение стекла, микроскопа, цемента, плавка стали, меди.

Промышленное использование вакуумной плавки металлов началось около полувека назад. Вакуумные технологии характеризуются пониженным давлением воздуха в плавильной камере $10^{-3} \dots 10^{-6}$ мм рт. ст. Они позволяют очищать металл от газов (азота, кислорода и водорода) и используются в производстве ответственных изделий. В вакуумных индукционных печах выплавляют особо чистые металлы, стали и сплавы.

Индукционные установки с применением токов высокой частоты (ТВЧ) для вакуумной плавки металлов широко применяются на промышленных предприятиях. Вакуумные процессы определяют развитие высоких технологий и относятся к экологически чистым процессам.

Выходное напряжение источника питания вакуумной индукционной электропечи для исключения в ней электрических разрядов не должно превышать 400 В.

Обычные технические решения, снижающие возможность электрических пробоев вакуумной электропечи — подключение преобразователя через сетевой трансформатор, либо применение понижающего разделительного высокочастотного трансформатора в выходном контуре — используются при питании от электромашинного генератора. Замена машинно-

го генератора тиристорным преобразователем частоты позволяет исключить необходимость применения понижающих трансформаторов.

В схеме несимметричного тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ) выходное напряжение можно уменьшить до необходимой величины без использования выходного трансформатора [1]. Особенностью подключения ТПЧ к вакуумной печи является симметрирование выхода тиристорного инвертора относительно «земли» (коммутирующий конденсатор и коммутирующий дроссель разделяются на две симметричные части). Величина емкости удваивается по сравнению с аналогичным преобразователем для открытой плавки, но установленная мощность конденсаторов при этом не увеличивается.

На рис. 1 показаны функциональные узлы ТПЧ, параметры которых необходимо определить для использования в составе вакуумных плавильных установок.

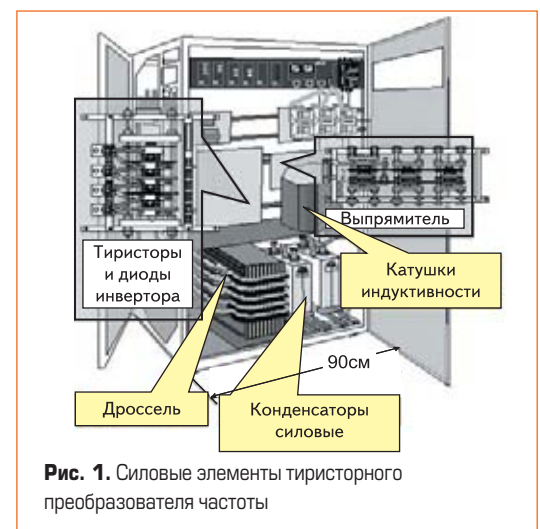


Рис. 1. Силовые элементы тиристорного преобразователя частоты

Конструктивное исполнение этих узлов не меняется. Определяющий размер — 90 см — показывает относительные габариты функциональных узлов ТПЧ: катушки индуктивности, силовых электротермических конденсаторов и входного дросселя постоянного тока.

Задача схемотехнического моделирования — определить параметры названных функциональных узлов таким образом, чтобы выходное напряжение ТПЧ не превышало 400 В при выходной мощности ТПЧ 120 кВт и частоте выходного тока 2000 Гц.

Схемотехническая модель ТПЧ

Схемотехническая модель тиристорного преобразователя частоты для вакуумной плавки металлов показана на рис. 2. Она состоит из выпрямителя (6 диодов 1N4148), тиристорного несимметричного инвертора (тиристор SCR с обратным напряжением VDRM = 5 к) и нагрузочного колебательного контура.

На рис. 2 приведена схемотехническая модель нагрузки с индуктором, подключенным симметрично относительно выхода ТПЧ. Индуктор заземлен через очень большое сопротивление. Не показаны параметры компонентов, величина которых не критична для моделирования.

Индуктивность входного дросселя инвертора достаточно велика — 3 мГн. Поэтому выпрямитель для несимметричного тиристорного инвертора с обратным диодом является источником тока.

Частота включения тиристора автономного инвертора — 1 кГц. Встречно-параллельный тиристор (обратный) неуправляемый диод обеспечивает циркуляцию реактивной мощности в инверторе при изменении нагрузки. В этом инверторе напряжение на полупроводниковых элементах не изменяется в зависимости от нагрузки. Это свойство рассматриваемой схемы тиристорного инвертора способствует ее широкому применению.

На рис. 3 приведены PSpice-модели основных элементов преобразователя. Трехфазный источник переменного тока промышленной частоты представлен моделями синусоидальных источников ЭДС — A, B и C.

Импульсный источник IMPULSE представляет собой схему управления ТПЧ. Модель MODEL IMPULSE PUL формирует импульсы длительностью 20 мкс с частотой повторения 1 мс амплитудой 20 В. PSpice-модели диодов представлены далее.

PSpice-описания моделей формируются программой MicroCap автоматически и могут корректироваться пользователем.

Исследование схемотехнической модели

Задача исследований изображенной на рис. 2 схемотехнической модели — определить параметры элементов тиристорного инвертора для применения в ТПЧ с установками индукционной вакуумной плавки. Так как ТПЧ в номинальном режиме работает с резонансной нагрузкой, в схемотехнической модели необходимо изменять частоту выходного тока, либо определить параметры нагрузки в соответствии с этой частотой.

На рис. 4 приведены результаты анализа схемотехнической модели — частотная характеристика индуктора вакуумной электропечи, согласно которой резонансная частота колебательной нагрузки составляет 2 кГц.

Иследуемая схема инвертора может работать с нагрузкой на первой, либо второй гармонике выходного тока. При резонансной частоте контура нагрузки 2 кГц и выходной частоте тиристорного инвертора 1 кГц используется вторая гармоника выходного тока.

На рис. 5 показана форма выходного тока несимметричного автономного инвертора. Переходный процесс изменения амплитуды тока конденсатора I (C2), с момента начала расчета при нулевых начальных условиях, заканчивается через 20 мс. Для определения установившихся значений токов и напряжений в схемотехнической модели необходимо время расчета, которое не меньше этого значения. Расчет входной или выходной мощности требует установки большего интервала расчетного времени. Для экономии времени и памяти компьютера шаг расчета можно увеличить.

Форма тока имеет несинусоидальный характер, обусловленный наличием обязательной «паузы» — интервала выключенного состояния полупроводниковых вентилялей. Величина паузы определяет амплитуду напряжения на элементах инвертора и выходную мощность.

Длительность паузы в выходном токе тиристорного инвертора определяет гармонический состав тока. Увеличение паузы снижает мощность инвертора и изменяет амплитуды первой и второй гармоники в выходном токе.

На рис. 6 показаны амплитуды первых трех гармоник в одном периоде установившегося значения выходного тока. Амплитуда второй гармоники на треть меньше первой гармоники, а режимы работы полупроводниковых элементов инвертора соответствуют номинальным режимам. Аналогичные кривые для тока



Рис. 2. Схемотехническая модель ТПЧ

```

.MODEL A SIN (A=310 F=50 RS=0.01)
.MODEL B SIN (A=310 F=50 PH=2.0944 RS=0.01)
.MODEL C SIN (A=310 F=50 PH=4.1888 RS=0.01)

.MODEL IMPULSE PUL (P1=0 P2=0 P3=20u P4=20u P5=1000u VONE=20 VZERO=-5)

.MODEL $GENERIC D (BU=5000)

*** From File C:\MICROCAP9\Library\SMALL.LBR
.MODEL 1N4148 D (BU=1000 CJO=1.362509p IS=7.053687n N=300n H=1.943332
+ RL=3.476728G RS=470.116838n TT=8.952928n UJ=7.407191)
    
```

Рис. 3. PSpice-описания моделей схемотехнического файла ТПЧ



Рис. 4. Частотный анализ колебательного контура нагрузки ТПЧ

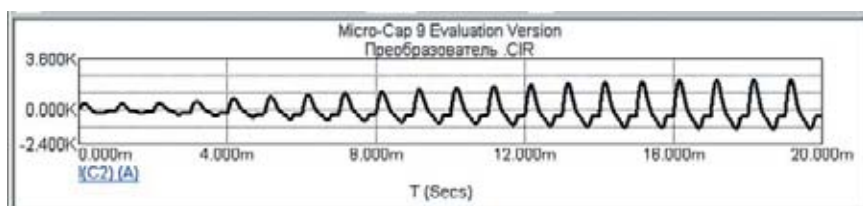


Рис. 5. Временная диаграмма выходного тока ТПЧ

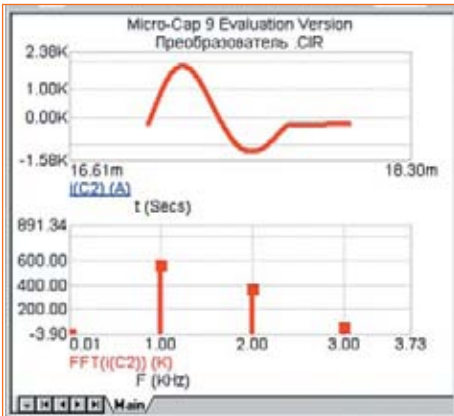


Рис. 6. Содержание гармоник в кривой выходного тока ТПЧ

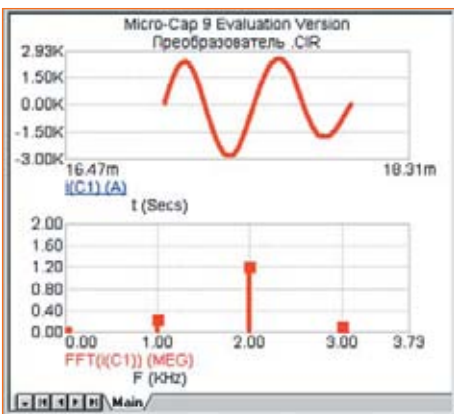


Рис. 7. Содержание гармоник в нагрузочном контуре ТПЧ

нагрузки, приведенные на рис. 7, показывают, что в колебательном контуре максимальной является вторая гармоника с частотой 2 кГц.

Содержание гармоник в кривой выходного тока ТПЧ определено разложением ее в ряд Фурье (процедура FFT). Проведенный анализ показывает, что работа тиристорного инвертора на второй гармонике обеспечивает необходимые параметры ТПЧ.

На рис. 8 показана номинальная мощность ТПЧ при указанных на схематехнической модели параметрах коммутирующих элементов. Кривая мощности получена перемножением выходного тока инвертора I (C2) и выходного напряжения V (C1).

Условное время расчета схематехнической модели для получения последней кривой составляет 1 с. Сохранение рассчитанных значений подобных файлов требует 50–500 Мбайт дискового пространства. Для дальнейшего использования схематехнической модели ТПЧ необходимо хранить исходный расчетный файл в формате .cir объемом 10–20 кбайт.

На рис. 9 представлено напряжение на тиристорах ТПЧ при номинальной мощности 120 кВт. Величина напряжения соответствует применению в ТПЧ четырех силовых тиристоров 10-го класса. Время восстановления тиристоров в этой схеме позволяет повысить выходную частоту до 20 кГц. Следовательно, вносить изменения в конструкцию и комплектацию функционального узла силовых вентилей ТПЧ нет необходимости.

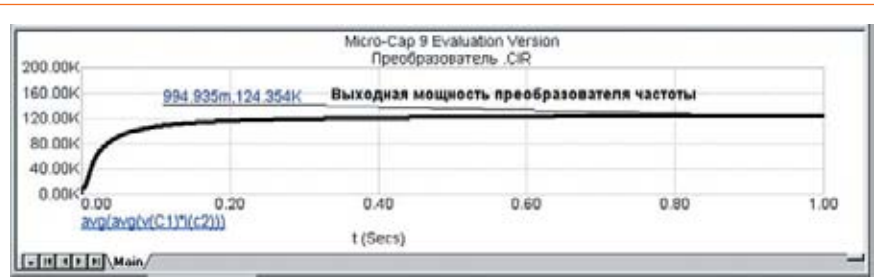


Рис. 8. Кривая выходной мощности тиристорного преобразователя частоты



Рис. 9. Напряжение на тиристорах ТПЧ

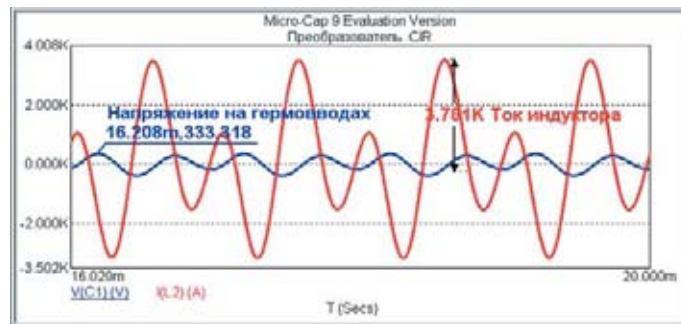


Рис. 10. Проверка величины выходного напряжения и тока ТПЧ для индукционной вакуумной плавки

На следующем этапе исследований произведем проверку выполнения основного условия, необходимого для применения ТПЧ в вакуумных установках — получение необходимой мощности (120 кВт) при выходном напряжении ТПЧ менее 400 В.

Согласно рис. 10 максимальное напряжение на выходе ТПЧ составляет 333 В. Это напряжение приложено к герметичному вводу индуктора, через который протекает переменный ток той же частоты, форма которого показана также на рис. 10.

Отличие тока и напряжения на индукторе от синусоидальной формы не позволяет использовать для их измерения приборы. Поэтому мы не отмечаем на графиках средние и действующие значения. В то же время полученные кривые практически не отличаются от аналогичных кривых на экране цифровых осциллографов, что позволяет судить об адекватности протекания процессов в ТПЧ и его схематехнической модели, основанной на PSpice-моделях. Это подобие внешнее, они имеют различную природу — физическую, либо математическую.

Современные PSpice-модели элементов учитывают рабочую температуру и паразитные параметры. Оболочка применения этих моделей — программы-симуляторы (типа MicroCap и др.) также совершенствуются [2] и становят-

ся обычным приложением персональных компьютеров, как Word, Excel и другие приложения Windows, знание которых необходимо техническим специалистам в области силовой электроники.

С другой стороны, названные программы настолько просты, что многие пользователи считают достаточными их знания в минимальном объеме — «открыть, напечатать, сохранить». В Word так можно работать с документом объемом не более 3 страниц. С большими документами нужно работать в режиме структуры, использовать стили и их форматирование, автоматическую нумерацию внедренных объектов (рисунки, формулы), перекрестные ссылки и др. и,

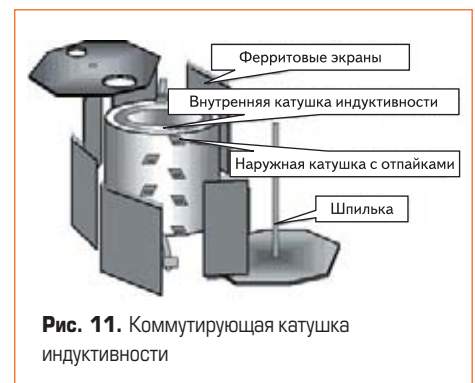


Рис. 11. Коммутирующая катушка индуктивности

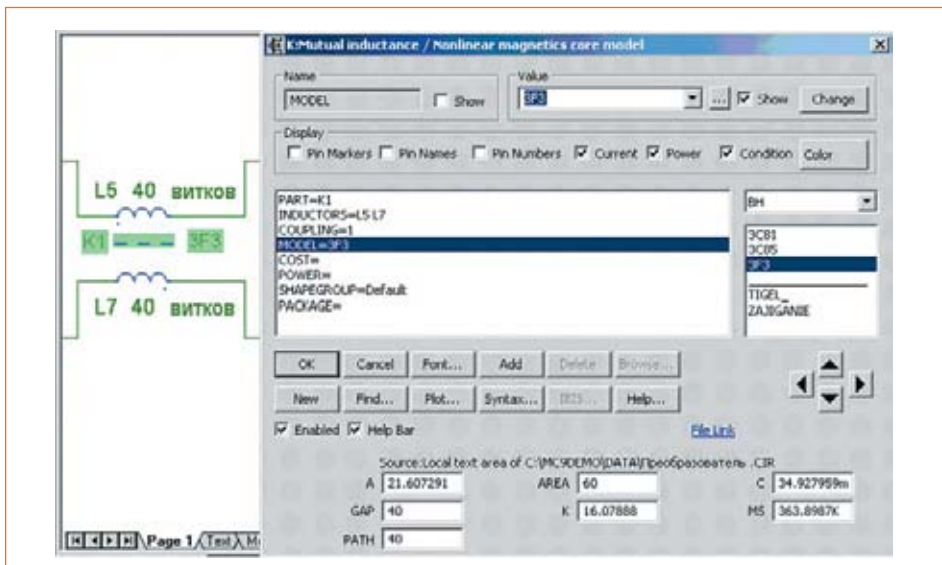


Рис. 12. Модель сердечника катушки индуктивности тиристорного инвертора



Рис. 13. Рабочее окно программы MicroCap с изображением схематехнической модели тиристорного инвертора и нагрузки

наконец, формировать оглавление. Сказанное относится и к программам схематехнического моделирования.

Выполнение требований симметрии выходного напряжения ТПЧ относительно «земли» обеспечивается симметричным включением обмоток индуктивных элементов — дросселя и коммутирующей индуктивности и обеспечением электромагнитной связи между витками катушек.

На рис. 11 показана конструкция коммутирующей индуктивности, состоящей из двух катушек, выполненных из медной трубки

достаточного сечения для протока охлаждающей воды. Для изменения индуктивности наружная катушка выполнена с отпайками. Она заключена в экран, выполненный из феррита.

Схематехническая модель для определения индуктивности коммутирующей катушки тиристорного инвертора при протекании ТВЧ показана на рис. 12. Справа, на панели параметров сердечника K1, обеспечивающего взаимную связь обмоток силовой катушки индуктивности, показаны параметры PSpice-модели сердечника.

Функции сердечника катушки выполняют ферритовые экраны, основным назначением которых является уменьшение нагрева металлических элементов конструкции ТПЧ. Использование модели сердечника коммутирующей катушки в схематехнической модели тиристорного инвертора позволяет определить необходимую величину индуктивности ее обмоток.

Воздушный зазор дросселя постоянного тока определяется с помощью параметрических кривых изменения индуктивности дросселя от величины тока в нем [3].

На рис. 13 представлена скорректированная в результате проведенных исследований схематехническая модель несимметричного тиристорного инвертора и нагрузки ТПЧ для вакуумной плавки металлов.

При схематехническом моделировании используется практика проектирования и теории устройств силовой электроники, поэтому при исследовании схематехнических моделей этапы синтеза и анализа схем силовой электроники не разделяются.

Заключение

1. Схематехническое моделирование позволяет с необходимой точностью рассчитать переходные и установившиеся режимы электромагнитных процессов в ТПЧ. Проверка проводилась путем сравнения их с осциллограммами аналогичных кривых.
2. Несимметричный тиристорный инвертор соответствует требованиям, предъявляемым к электропитанию вакуумных индукционных установок ТВЧ частотой 2–8 кГц, мощностью 60–160 кВт. При этом обеспечивается симметрия выходного напряжения преобразователя относительно «земли».

Литература

1. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
2. Златин И. Новые возможности программы схематехнического моделирования MicroCap // Компоненты и технологии. 2007. № 10.
3. Валиуллина З., Зинин Ю. Схематехническое моделирование силовых дросселей для тиристорных преобразователей повышенной частоты // Силовая электроника. 2007. № 1.