

# Эквивалентное представление переменной нагрузки

## в схемотехнической модели индукционной установки для порционной плавки металлов

**Специфика плавильных индукционных установок состоит в том, что они работают в длительном цикле периодического нагрева — от загрузки холодной шихты до ее расплавления, а затем интервала необходимой выдержки и выгрузки расплава металла. Диапазон изменения эквивалентной нагрузки автономного инвертора при индукционной плавке очень широк.**

**В статье приведены некоторые результаты исследований схемотехнической модели тиристорного мостового инвертора с обратными диодами и удвоением частоты, широко применяемой в тиристорных преобразователях для установок порционной плавки металлов токами повышенной частоты.**

**При экспериментальных и теоретических исследованиях тиристорного инвертора индукционной установки в некоторых случаях, как, например, при плавке, правомерно представлять нагрузку эквивалентным активным сопротивлением. Рассмотрены условия эквивалентной замены колебательного контура индукционной электропечи омическим сопротивлением нагрузки тиристорного инвертора.**

Юрий Зинин

umz42@mail.ru

### Введение

При изменении параметров индукционной плавильной печи в ходе разогрева, плавки или разлива металла меняется эквивалентная нагрузка автономного инвертора и его входная мощность, потребляемая от источника питания. При исследованиях автономного инвертора возникает проблема представления параметров плавильной печи — индуктора, тигля, расплава металла. Обобщенным показателем процесса плавки является потребляемая от источника питания мощность, которая, в основном, отдается в нагрузку. Ниже покажем, что при схемотехническом моделировании индукционной плавильной установки на резонансной частоте нагрузки автономного полупроводникового инвертора возможно и целесообразно представление нагрузочного контура эквивалентным сопротивлением.

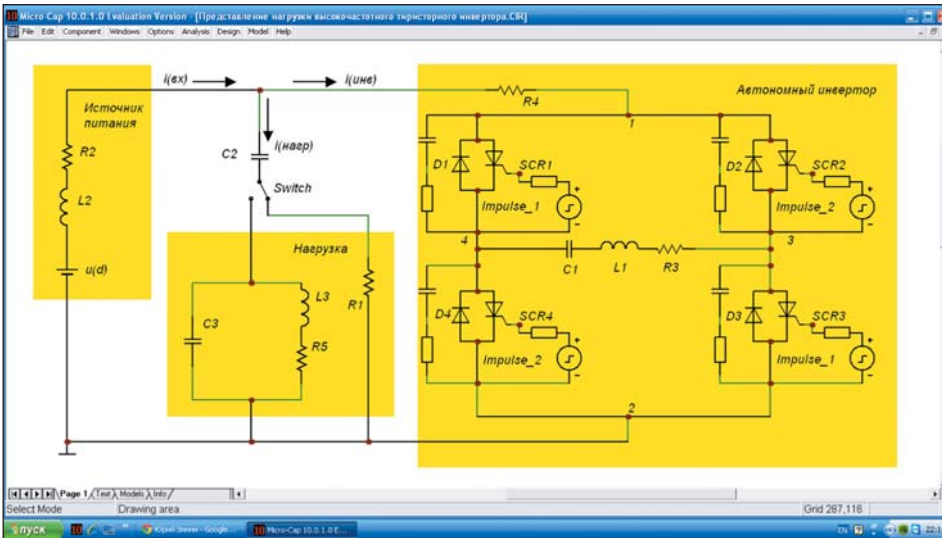
Тиристорный мостовой инвертор — наиболее часто применяемая силовая схема для тиристорных преобразователей повышенной частоты (ТПЧ) в установках индукционного нагрева металлов. Его преимущества — квазирезонансный режим работы и использование стабилизированного обратными диодами инвертора тока — рассмотрены в большом количестве опубликованных материалов [1–7].

Свыше 40 лет схема мостового инвертора с удвоением частоты является основой для разработки но-

вых тиристорных преобразователей частоты для индукционного нагрева металлов [8]. Такие преобразователи и их современные модификации на JGBT-компонентах в настоящее время продолжают вводиться в эксплуатацию на промышленных предприятиях России. В настоящее время в г. Уфа продолжают работать многие организации, которые успешно продолжают традиционное научное направление — разработку новых статических преобразователей повышенной частоты для электротермических установок индукционной плавки металлов и других применений. Индукционные установки для плавки металлов в настоящее время разрабатываются и производятся в комплексе с плавильными электропечами.

Несмотря на уменьшение поставок оборудования для традиционных промышленных отраслей производства России, отдельные направления науки, в которых отечественные ученые лидировали, продолжают развитие. К таким направлениям относится и силовая электроника, которая сегодня использует, в основном, зарубежную компонентную базу, но создает на ее основе новые отечественные разработки [9–11].

Эффективным инструментом исследования схемотехнических моделей силовых устройств электроники является программа Micro-Cap, которая удобна для пользователей преемственностью поколений, доступным справочным материалом, а также использованием стандартных PSpice-моделей полу-



**Рис. 1.** Схематехническая модель автономного тиристорного инвертора с источником питания и вариантами подключения колебательной и эквивалентной нагрузки через анимированный переключатель

проводниковых компонентов и бесплатным распространением демо-версии от фирмы-разработчика по электронной почте [12, 13].

Исследование ТПЧ целесообразно производить с помощью программы схематехнического моделирования Micro-Cap различных версий и других силовых симуляторов, использующих PSpice-описания моделей силовых полупроводниковых элементов.

### Схематехническая модель автономного тиристорного мостового инвертора для индукционной установки

На рис. 1 представлена схематехническая модель автономного тиристорного инвертора с обратными диодами, подключенного к источнику питания через входной дроссель постоянного тока.

Тиристорные преобразователи частоты, созданные на основе этой схемы, нашли широкое

применение в технологиях индукционного нагрева металлов и являются основой для новых схем на JGBT-компонентах. Встречно-параллельные силовые диоды позволяют стабилизировать напряжения и токи тиристорного инвертора при переменной нагрузке [14].

В цепи источника напряжения инвертора  $u(d)$  включен входной дроссель L2 со значительной индуктивностью и небольшим сопротивлением потерь R2, обеспечивающий придание источнику питания инвертора свойств источника тока, соответственно также автономный инвертор приобретает свойства инвертора тока, удобные для согласования инвертора с индуктором плавильной электропечи.

Через отдельный конденсатор C2 и анимированный коммутатор Switch параллельно автономному инвертору и источнику постоянного тока подключена нагрузка схематехнической модели [15]. Нагрузка схематехнической модели представлена в двух вариантах. Справа показан резистор R1, представляющий оми-

ческое сопротивление эквивалентной нагрузки на рабочей частоте автономного инвертора, а слева изображен резонансный колебательный контур, состоящий из индуктивности индуктора плавильной электропечи L3, резистора R5, имитирующего вносимое сопротивление в индуктор порционной загрузки, и конденсатора C3, обеспечивающего компенсацию реактивной мощности индуктора на рабочей частоте индукционной установки.

При очередной коммутации тиристорного автономного инвертора формирует в нагрузке ток почти синусоидальной формы удвоенной частоты по отношению к частоте включения каждого тиристора мостовой схемы. Удвоение выходной частоты тока автономного инвертора обеспечивается включением нагрузки инвертора последовательно с разделительным конденсатором C2. Удвоение рабочей частоты позволяет использовать в высокочастотном инверторе сравнительно низкочастотные тиристоры большой мощности.

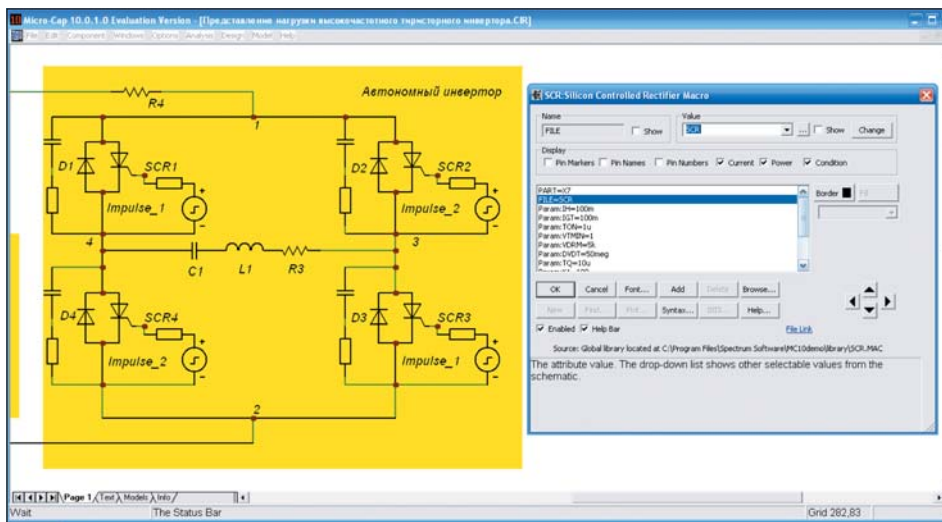
Постоянная составляющая выходного тока источника питания замыкается через мостовую схему тиристорного автономного инвертора. В цепи питания автономного инвертора показан небольшой измерительный резистор R4, регистрирующий однополярную компоненту входного тока —  $i(инв)$  мостовой схемы инвертора.

Полупроводниковые тиристоры образуют мостовую схему инвертора, подключенную в точках 1 и 2 к источнику питания постоянного тока, а в точках 4 и 3 — к реактивным элементам: коммутатору конденсатору и индуктивностям с небольшим активным сопротивлением потерь на частоте коммутации. Почти синусоидальная форма протекающего тока в течение одного полупериода рабочей частоты обеспечивает восстановление управляющих свойств ранее проводящих ток тиристоров в течение интервала протекания тока через неуправляемые диоды.

Тиристоры шунтированы в обратном направлении неуправляемыми диодами, назначением которых является циркуляция реактивной мощности в инверторе и стабилизация напряжения на элементах силовой схемы при изменении нагрузки автономного инвертора.

На схематехнической модели инверторного моста преобразователя частоты, представленной на рис. 1, показаны обычные элементы демпфирования коммутационных перенапряжений — небольшие конденсаторы и резисторы. Включение тиристоров схематехнической модели ТПЧ осуществляется импульсами управления, формируемыми с помощью модели управляемого генератора импульсов специальной формы. Основным назначением системы управления ТПЧ является регулирование рабочей частоты инвертора в соответствии с изменением резонансной частоты нагрузочного колебательного контура индукционной плавильной печи для поддержания максимальной мощности в нагрузке.

На рис. 2 показана панель параметров кремниевых управляемых тиристоров (Silicon Controlled Rectifier Macro, SCR), использованных в схематехнической модели автономного инвертора.



**Рис. 2.** Панель Macro параметров кремниевых управляемых тиристоров схематехнической модели автономного инвертора

Тиристоры включаются от генераторов Impulse 1 и Impulse 2, формирующих импульсные сигналы необходимой длительности и выполняющих функцию выходного блока системы управления:

**.MODEL IMPULSE\_1 PUL (VONE=20 P1=0 P2=0 P3=1u P4=21u P5=400u);**

**.MODEL IMPULSE\_2 PUL (VONE=20 P1=200u P2=200u P3=201u P4=221u P5=400u);**

На рис. 3 представлена панель редактирования параметров кремниевых высоковольтных диодов, использованных в схематехнической модели автономного инвертора. Макросы тиристоров и модели диодов стандартные, они учитывают параметры по току, напряжению и времени восстановления.

### Исследование схематехнической модели индукционной высокочастотной плавильной установки

Основной задачей моделирования является проверка условий замены омическим резистором реального колебательного контура нагрузки индукционной установки, в котором возможно одновременное изменение всех параметров. Это позволит провести исследование поведения схематехнической модели на разных этапах плавки металлов — от ее начала до разливки.

На рис. 4 показана форма токов в автономном инверторе, красным цветом изображен входной ток  $i(vx) = i(R2)$ , обеспечиваемый источником питания. Две аналогичные кривые тока нагрузки  $i(нагр) = i(R1)$  и тока мостовой схемы инвертора  $i(инв) = i(R4)$  сдвинуты по оси ординат на величину постоянной составляющей входного тока. В пределах рабочего периода инвертора имеются два интервала проводимости полупроводниковых вентилей и две «паузы» — периоды их непроводящего состояния.

Величина входного тока 100 А соответствует входной мощности индукционной установки 50 кВт, аналогичные графики мы получаем при подключении в качестве нагрузки резонансного колебательного контура [14].

Проводимые с помощью программы схематехнического моделирования Micro-CAP 10 частотный (AC) и Transient-анализ представлены ниже графиками электромагнитных процессов. Определение рабочей частоты нагрузочного контура индукционной установки производится анализом частотных характеристик инвертора.

На рис. 5 приведены амплитудно-частотные характеристики эквивалентного сопротивления нагрузки и разделительного конденсатора в расширенном диапазоне частот тиристорного инвертора. При частотном анализе проверяется отсутствие резонансов в рабочей области частот с нагрузкой в виде активного сопротивления. Схематехническим моделированием с колебательным контуром нагрузки определяется настройка частоты включения тиристоров инвертора на резонансную частоту его колебательной нагрузки. В этом случае индукционная установка

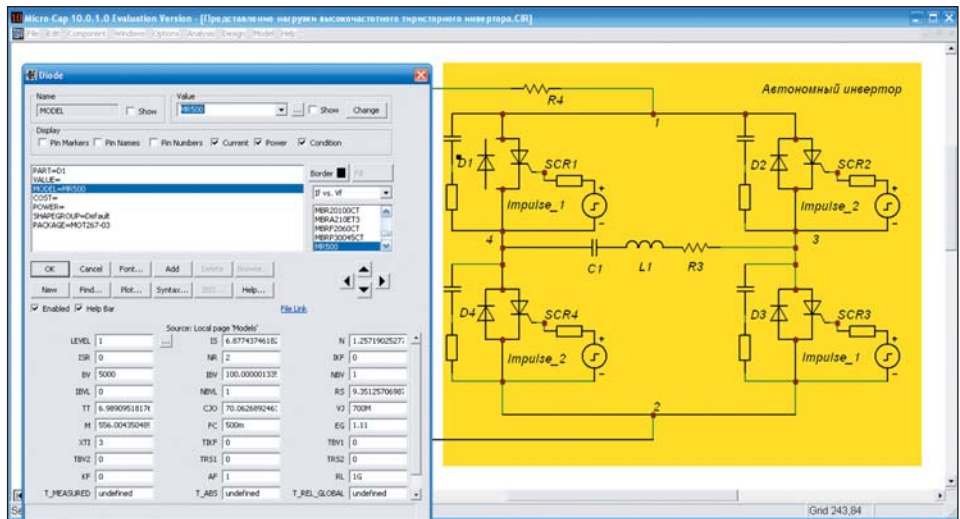


Рис. 3. Панель Макро параметров кремниевых высоковольтных диодов, использованных в схематехнической модели автономного инвертора

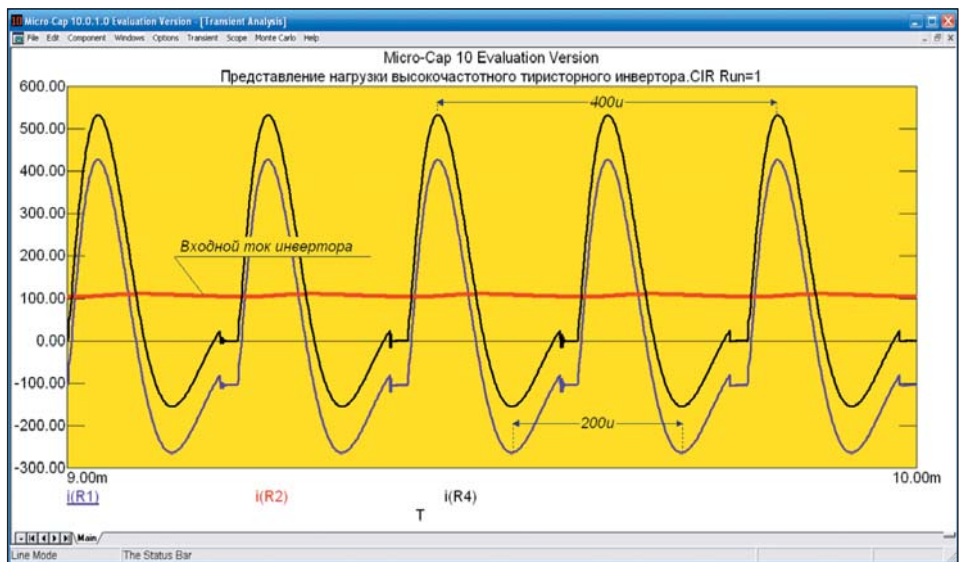


Рис. 4. Токи схематехнической модели автономного инвертора  $i(vx) = i(R2)$ ,  $i(нагр) = i(R1)$  и  $i(инв) = i(R4)$  при нагрузке инвертора омическим сопротивлением

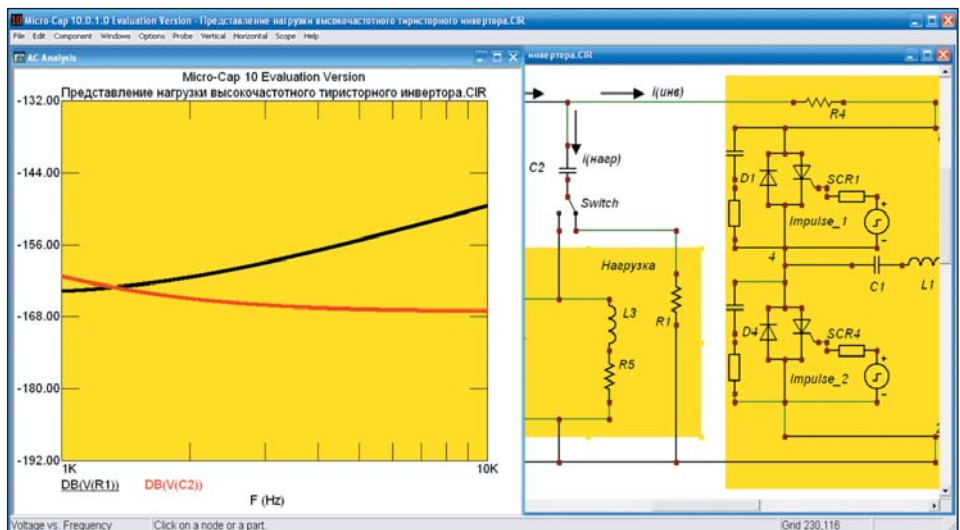


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики (слева) эквивалентного сопротивления нагрузки и разделительного конденсатора в расширенном диапазоне частот индукционной установки

ка потребляет максимально возможную мощность.

Параметры компонентов нагрузочной цепи схемотехнической модели следующие: емкость разделительного конденсатора С2 — 120 мкФ; эквивалентное сопротивление нагрузки R1 — 1 Ом; индуктивность индуктора нагрузки L3 — 10 мГн; внесенное в колебательную нагрузку сопротивление R5 — 0,1 Ом; емкость компенсирующего конденсатора С3 — 100 мкФ. Установленному периоду включения тиристор инвертора (400 мкс) соответствует рабочая частота в нагрузке 5 кГц. Резонансная частота нагрузочного колебательного контура также равна 5 кГц, при этом инвертор потребляет от источника питания ток 100 А, что соответствует максимально возможной мощности индукционной установки 50 кВт.

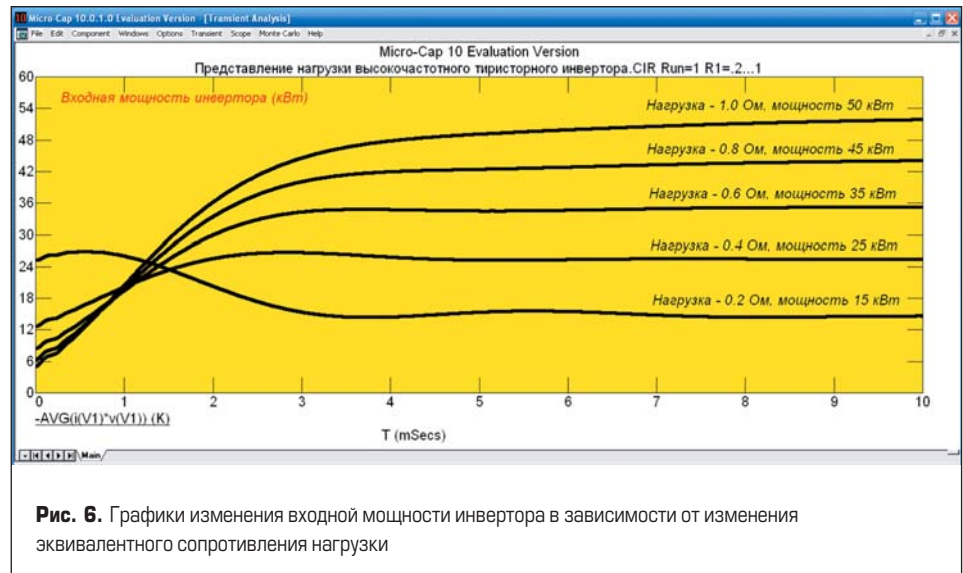
На рис. 6 показаны графики изменения среднего значения входной мощности инвертора в зависимости от изменения эквивалентного сопротивления нагрузки. На схемотехнической модели эквивалентное сопротивление нагрузки увеличивалось ступенями по 0,2 Ом до максимальной величины 1 Ом.

Полученные результаты для инвертора с рабочей частотой 5 кГц мощностью 50 кВт позволяют однозначно определить изменение эквивалентного сопротивления нагрузочного колебательного контура индукционной установки для порционной плавки металлов по показаниям входных приборов.

Поддержание максимальной мощности тиристорного преобразователя при изменении эквивалентных параметров нагрузки при плавке осуществляется автоматическим регулированием его рабочей частоты, которая воздействует на колебательный контур, образованный индукционной электропечью и компенсирующим (печным) конденсатором.

### Заключение

Рассмотрен прием моделирования электромагнитных процессов в мостовом резонансном инверторе для исследования процесса плавки металлов в порционной индукционной печи с помощью эквивалентной замены нагрузочного колебательного контура на омическое сопротивление нагрузки.



### Литература

1. Зинин Ю., Рахимова И. Мостовая схема тиристорного инвертора тока для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2009. № 3.
2. Зинин Ю. М. Анализ электромагнитных процессов в мостовом резонансном инверторе с обратными диодами // Электричество. 2009. № 9.
3. Зинин Ю. М. Анализ гармоник выходного тока тиристорных полрезонансных инверторов // Электричество. 2008. № 8.
4. Валиуллина З., Зинин Ю. Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 2.
5. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
6. Зинин Ю. Схемотехническая модель индукционного комплекса с тиристорным преобразователем частоты // Силовая электроника. 2009. № 4.
7. Зинин Ю. Исследование функциональных узлов источника питания для индукционного высокочастотного комплекса // Силовая электроника. 2008. № 2.
8. АС № 235177 (СССР) Независимый инвертор / С. М. Кацнельсон, В. С. Ухов // Бюл. 1969. № 5.
9. <http://www.business-gazeta.ru/article/79609/>
10. Пат. № 2215361 (РФ) Мостовой инвертор / Ю. М. Зинин, А. В. Ветошкин, Ю. П. Ройзман. 2003.
11. Гришанин А., Мускатиный В., Бормотов А. Силловые полупроводниковые ключи для преобразователей частоты систем индукционного нагрева // Силовая электроника. 2010. № 3.
12. <http://www.spectrum-soft.com/demodownnew.shtm>.
13. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. М.: Горячая линия-Телеком. 2003.
14. Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат. 1989.
15. Зинин Ю. Представление нагрузки при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2008. № 1.