

УДК 621.314.572

Ю. М. ЗИНИН

## МЕТОДИКА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕНОВАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ИНВЕРТОРНО-ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Приведены результаты разработки методики схемотехнического моделирования несимметричного тиристорного инвертора в программе Electronic Microcomputer Circuit Analysis Program — MicroCap 7 для анализа содержания гармоник в кривой выходного тока. Проведенные исследования позволили сделать обоснованный выбор частоты и увеличить выходную мощность инверторно-индукционного плавильного электротехнического комплекса. Показано, что целесообразна перенастройка контура электротермической нагрузки на первую гармонику выходного тока несимметричного резонансного инвертора. *Схемотехническое моделирование; резонансный инвертор; гармоники выходного тока; электротермический плавильный комплекс*

Рациональное использование по мощности и частоте электротехнических комплексов индукционной плавки металлов требует исследования гармонического состава выходного тока. Это вызывает значительные трудности, особенно при анализе автономного инвертора совместно с колебательным нагрузочным контуром, когда необходимо учитывать их взаимное влияние [1–3].

Исследование взаимного влияния тока инвертора и тока нагрузки на содержание гармоник целесообразно проводить средствами схемотехнического моделирования. К таким средствам следует отнести, в первую очередь, программу Microcap профессиональной версии. Программа, в частности, позволяет выявить гармонический состав любой полученной при моделировании периодической кривой тока или напряжения методом цифровой обработки сигнала [4].

Так как программы схемотехнического моделирования появились сравнительно недавно, а в эксплуатации находится большое количество созданных нами ранее электротермических установок, проверка рациональных режимов их эксплуатации является актуальной задачей. В ряде случаев по результатам схемотехнических исследований проводится реновация дорогостоящей техники, как это описано в настоящей работе.

В принципиальной электрической схеме (рис. 1) тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ), представляющей созданный нами файл ... CIR программы схемотехнического

моделирования Electronic Microcomputer Circuit Analysis Program — Microcap 7, элементы схемы для удобства восприятия изображения показываюются в стандартном российском начертании.

В профессиональных версиях подобных программ схемотехнического моделирования, основанных на применении Spice-моделей, нет ограничений на количество используемых элементов. Поэтому в состав схемотехнической модели ТПЧ, кроме автономного инвертора, включаем питающую сеть, трехфазный выпрямитель и аналог нагрузочного контура индукционной плавильной электропечи — индуктор и группу компенсирующих конденсаторов.

Сказанное выше позволяет принять во внимание при схемотехническом моделировании питающую трехфазную промышленную сеть переменного тока ( $V3$ ,  $V4$  и  $V5$ ), наличие в инверторе нелинейного дросселя насыщения с ферритовым сердечником (PART K1), классификационные параметры мощных высоковольтных диодов ( $D1 \dots D11$ ), а также учесть в макросах параметры силовых тиристоров типа ТБ-400 ( $X6 \dots X9$ ).

Модели источников напряжения трехфазной питающей сети приняты следующими:

\*\*\* 0 Phase Leg .MODEL 3PHASEA SIN (F=50 A=310 RS=0),

\*\*\* 120 Phase Leg .MODEL 3PHASEB SIN (F=50 A=310 PH=2.0944 RS=0),

\*\*\* 240 Phase Leg .MODEL 3PHASEC SIN (F=50 A=310 PH=4.1888 RS=0).

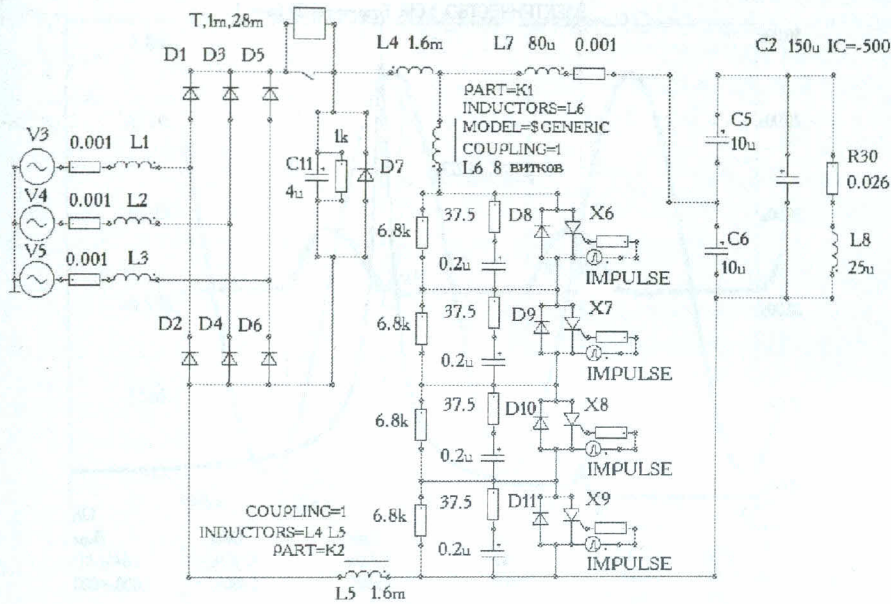


Рис. 1. Схемотехническая модель тиристорного преобразователя частоты

Модель тиристоров (X6...X9) — макро-  
модель с параметрами

SCR(100m,100m,1u,1,5k,50meg,10u,100,1).

Модель диодов

.MODEL \$GENERIC D (IS=8N N=2 BV=1000 RS=4M  
TT=1000P CJO=2.5P VJ=5M M=100M + RL=5G).

Это стандартные модели, учитывающие все классификационные параметры силовых электронных элементов по току, величине допустимого напряжения и т. д. Точность представления ВАХ силовых полупроводниковых приборов не хуже паспортных данных изготовителя.

Включение тиристоров схемотехнической модели ТПЧ имитируется импульсами управления, формируемыми генератором импульсов специальной формы

.MODEL IMPULSE PUL (VONE=15 P1=700U P2=702U  
P3=702U P4=720U P5=772.201U).

В модели генератора учитывается длительность переднего фронта импульса управления тиристорами, вызванная наличием в цепи управления тиристором ТПЧ импульсных трансформаторов.

Параметры сердечника дросселя насыщения L7, следующие:

\*\*\* Generic Core .MODEL \$GENERIC CORE (AREA=20  
PATH=40 MS=350K A=15 K=700M ALPHA=100U).

Параллельно силовым полупроводниковым элементам инвертора для распределения постоянной и импульсных составляющих приложенного напряжения включены демпфирующие RC-цепочки и высокоомные резисторы.

**Первым этапом исследования модели** является получение ее частотной характеристики (AC Analysis), необходимой для установки частоты инвертирования [5]. Затем PSpice модель импульсного генератора, управляющего тиристорами несимметричного инвертора (IMPULSE), моделирует форму управляющего сигнала с частотой повторения (2,561 кГц), соответствующей собственной частоте нагрузочного колебательного контура, согласно рис. 2.

С задержкой в 1 мс, относительно начала расчета переходных процессов, формируемой аналогом входного реле (T,1m,28m), происходит имитация пуска автономного инвертора. Вторая величина в параметрах этого элемента — 28 мс — определяет момент выключения автономного инвертора при его схемотехническом моделировании или окончания расчетного интервала.

В процессе формирования тока высокой частоты из постоянного входного напряжения автономного резонансного тиристорного инвертора на выходе получают несинусоидальную кривую однофазного тока с высоким содержанием гармоник. Данное обстоятельство, как будет показано ниже, имеет большое значение.

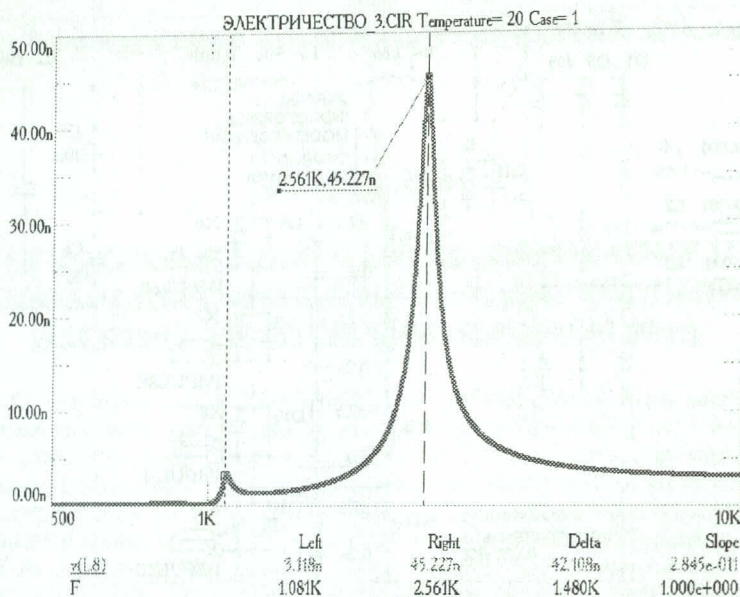


Рис. 2. Частотный анализ (AC Analysis) нагрузочного контура автономного инвертора

Проведение частотного анализа необходимо для установления частоты основного резонанса колебательного контура нагрузки в расчетной модели и настройки системы управления. Левая резонансная кривая, видимая на рис. 2, обусловлена параметрами дросселя постоянного тока автономного инвертора.

**Вторым этапом исследования схемотехнической модели** является проведение анализа переходных процессов (Transient Analysis) [6]. На рис. 3 приведен фрагмент (в интервале между 9 и 10 миллисекундами с момента начала расчетного интервала) квазиустановившегося значения кривых тока инвертора и нагрузки схемотехнической модели рис. 1.

Исследования проводились для настройки нагрузочного контура инвертора на первую гармонику выходного тока. Амплитудные значения токов, протекающих через тиристоры и диоды (*JL7*), в сравнении с амплитудой тока индуктора (*JL8*) полностью определяют добротность нагрузочного контура инвертора.

Ток тиристора и ток диода разделены интервалом насыщенного состояния дросселя *L6*.

**На последнем этапе анализа схемотехнической модели** получаем разложение в ряд Фурье кривой выходного тока инвертора путем применения метода цифровой обработки расчетного файла (DSP) переходных процессов схемотехнической модели [7]. Амплитуды и частоты основных гармоник показаны на рис. 4 снизу.

Гармонический состав выходного тока инвертора выявляется в ходе этого этапа расчета, затем колебательный контур нагрузки можно настроить на вторую гармонику, тогда первая, третья и другие составляющие будут циркулировать в инверторе, не совершая полезной работы. В случае настройки нагрузочного контура на вторую гармонику выходного тока инвертора получим в нем удвоение выходной частоты по отношению к частоте управления тиристорами, что требуется от тиристорного преобразователя при работе с индукционной плавильной электропечью меньшего объема садки.

Работа комплекса на второй гармонике предпочтительна, исходя из компромисса между выходной мощностью и условиями работы тиристоров и других элементов схемы, включая реактивные компоненты ТПЧ, обеспечивающие коммутационную устойчивость несимметричного автономного инвертора.

Частотный анализ по Фурье в ходе схемотехнического моделирования показывает, что при использовании тиристорного преобразователя для индукционного нагрева металлов с параметрами коммутирующих элементов, показанными на рис. 1, можно эффективно настроить нагрузочный контур и на третью гармонику выходного тока инвертора. Реактивный ток основной гармоники в этом случае дополнительно загружает его тиристоры, ограничивая выходную мощность инвертора значением в 25 кВт.

На графике рис. 4 приведены четыре рассчитанные гармоники выходного тока ТПЧ.

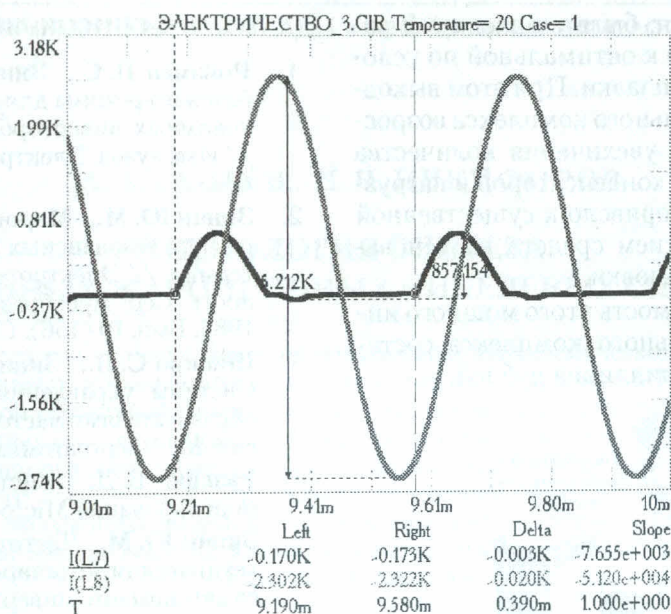


Рис. 3. Выходной ток инвертора и ток индуктора (Transient Analysis)

Амплитуда второй гармоники в сравнении с первой существенна, что позволяет, как это было реализовано, работать комплексу на второй гармонике выходного тока. Однако в схеме автономного инвертора циркулирует избыточная реактивная мощность [8, 9].

На рис.5 показан созданный ранее, когда еще не применялись методы схемотехнического моделирования, электротехнический комплекс для форсированной плавки черных металлов [10], который впоследствии исследовался средствами схемотехнического моделирования Microsar.

В результате проведенного анализа схемотехнической модели сделан вывод о том, что в рассматриваемой схеме с энергетической точки зрения целесообразна настройка колебательного контура нагрузки на первую гармонику выходного тока ТПЧ. Перенастройка нагрузки плавильного комплекса, созданного на основе тиристорного резонансного несимметричного инвертора, привела к увеличению его выходной мощности.

После указанной реновации рабочая частота нагрузочного контура плавильного комплекса, согласно результатам схемотехниче-

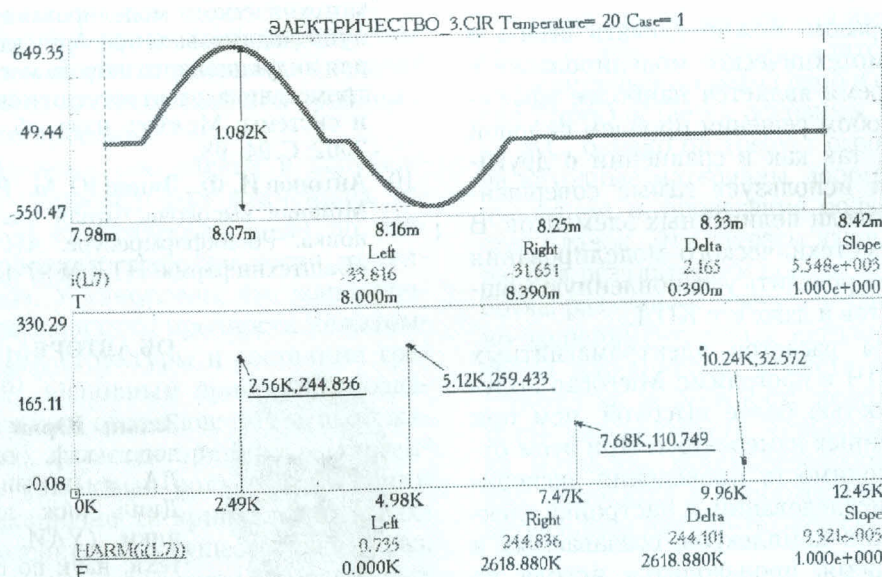


Рис. 4. Гармонический состав выходного тока автономного инвертора

ского моделирования, была снижена в 2 раза и оказалась ближе к оптимальной по условиям индукционной плавки. При этом выходная мощность плавильного комплекса возросла. Это потребовало увеличения количества электротермических конденсаторов в нагрузке, но, тем не менее, привело к существенной экономии предприятием средств на реновацию плавильной установки.

Заметим, что стоимость этого мощного индукционного плавильного комплекса составляет свыше одного миллиона рублей.

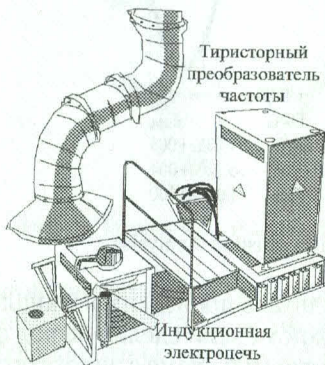


Рис. 5. Индукционный комплекс для форсированной плавки черных металлов

Технические параметры плавильной установки до и после ее реновации приведены в таблице.

Параметры	Таблица	
	До / после реновации	
Выходная мощность, кВт	250 / 320	
Рабочая частота, кГц . . . . .	2,4–4 / 1,2–2,4	
Время плавки, мин . . . . .	60 / 45	

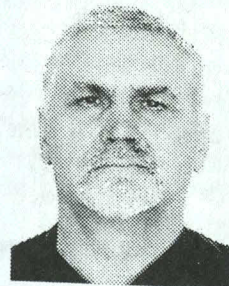
Таким образом, можно сделать вывод о том, что схемотехническое моделирование в настоящее время является наиболее эффективным способом решения проблем силовой электроники, так как в сравнении с другими методами использует самые совершенные Pspice модели нелинейных элементов. В процессе схемотехнического моделирования ТПЧ можно определить установленную мощность элементов и даже его КПД.

Результаты расчетов электромагнитных процессов ТПЧ в программе Microsar получают с точностью более высокой, чем при непосредственных измерениях. При этом отпадает необходимость проведения экспериментальных исследований, а настройка электротермических комплексов, создаваемых в настоящее время, производится исходя из результатов схемотехнического моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ройzman П. С., Зинин Ю. М. и др.** Метод базового режима для инженерного расчета автономных инверторов с обратными диодами // Изв. вузов. Электромеханика. 1981. С. 417–426.
2. **Зинин Ю. М., Марон В. М. и др.** Методика расчета резонансных инверторов для электротермии // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. М., 1983. Вып. 10 (156). С. 5–7.
3. **Шапиро С. В., Зинин Ю. М., Иванов А. В.** Системы управления с тиристорными преобразователями частоты для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989, 168 с.
4. **Разевиг В. Д.** Система схемотехнического моделирования Micro-Sap V. М.: Солон, 1997.
5. **Зинин Ю. М.** Частотный анализ при схемотехническом моделировании несимметричного автономного инвертора // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. Уфа, 2002. С. 107–111.
6. **Зинин Ю. М., Терешкин В. М.** Особенности моделирования переходных процессов тиристорных преобразователей частоты в системе Microsap // Теоретическая информатика – 2000: от теории к практике: Тр. междунар. конф. Уфа, 2000. С. 88–91.
7. **Зинин Ю. М.** Схемотехническое моделирование тиристорных преобразователей частоты // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2003. С. 181–186.
8. **Зинин Ю. М., Ройzman Ю. П.** Схемотехническое моделирование и разработка мощных тиристорных преобразователей частоты // Аэрокосмическая техника и высокие технологии: Всерос. науч.-техн. конф. ПГТУ, 2002.
9. **Зинин Ю. М., Ройzman Ю. П.** Методика схемотехнического моделирования силовых полупроводниковых преобразователей частоты для индукционного нагрева металлов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2002. С. 94–98.
10. **Антонов И. Ф., Зинин Ю. М., Ройzman Ю. П.** Мощная высокочастотная плавильная установка. Росинформресурс. АН РБ. РНТИК «Баштехинформ». НТД № 97-13. Уфа, 1997.

## ОБ АВТОРЕ



**Зинин Юрий Михайлович**, доц., каф. электрооборуд. ЛА и наземн. транспорта. Дипл. инж. электрон. техники (УАИ, 1969). Канд. техн. наук по сист. управления (УАИ в 1978). Иссл. в обл. полупроводн. преобраз. частоты.