

Управление однофазной пятидесятигерцовой индукционной плавильной печью

С ПОМОЩЬЮ ВСТРЕЧНО-ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ТИРИСТОРОВ

Однофазные пятидесятигерцовые индукционные плавильные печи (ПИПП) являются энергоемкими устройствами, что делает вопросы регулирования мощности и влияния на сеть при их работе актуальными. В настоящее время на отечественных предприятиях ПИПП чаще всего подключаются через трансформатор, который выполняет две основные функции: согласование печи с питающей сетью по напряжению и регулировку мощности печи. При этом регулировка мощности осуществляется за счет переключения секций обмоток трансформатора с помощью силовых электромеханических коммутационных устройств, расположенных в кожухе трансформатора, залитом трансформаторным маслом. Ремонт и замена этих коммутационных устройств возможны только при извлечении всего трансформаторного узла из бака, что требует больших трудозатрат и времени. В статье рассматриваются вопросы регулирования мощности ПИПП с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров, что позволяет снять некоторые вопросы, связанные с традиционной эксплуатацией печей.

Юрий Болотовский, к. т. н.

eltech@ufacom.ru

Георгий Таназлы, к. т. н.

g_thanazly@mail.ru

**Рифхат Юнусов
Игорь Яговцев**

Известны серийно выпускаемые тиристорные однофазные регуляторы, например, производимые ООО НПП «Электропроект» (г. Екатеринбург). Однако их непосредственное применение для регулирования мощности индукционных электропечей существенным образом ограничено следующими факторами:

- недостаточной максимально допустимой мощностью;
- отсутствием паспортных гарантий работы на нагрузку в виде колебательного контура (гарантируется работа только на активную и активно-индуктивную нагрузку);
- использованием фазного регулирования в пределах полуволн синусоиды, что также ограничивает рабочие диапазоны за счет возможных бросков тока при включении и коммутационных перенапряжений в момент выключения тиристоров;
- значительным количеством высших гармоник в фазных токах питающей сети и компенсирующем конденсаторе ПИПП.

При рассмотрении применения встречно-параллельно включенных тиристоров принимались во внимание следующие оценочные критерии плавильного комплекса с ПИПП: упрощение оборудования, спектральные составы токов в элементах пла-

вильного комплекса и питающей сети, симметрия напряжений на тиристорах и токов, протекающих через них, диапазон и плавность регулирования мощности, потери в тиристорах.

Рассмотрение электромагнитных процессов в плавильных комплексах с ПИПП проводилось с применением моделирования в среде OrCAD.

На рис. 1 приведен типовой вариант размещения ПИПП в промышленных условиях. Очевидно, что такой вариант является не единственным и возможны другие способы размещения указанного на рисунке оборудования, что приведет к изменению конфигурации силовых шинопроводов и, как следствие, к изменению их индуктивностей и активных сопротивлений.

Естественно, что в промышленности используются различные плавильные комплексы с ПИПП (мощность, тип применяемого трансформатора, конструкция шинопроводов, объем тигля, конструкция индуктора и самой печи, конструкция и место расположения батареи компенсирующих конденсаторов, настройка нагрузочного колебательного контура и т.д.). Это определяет отличие параметров элементов эквивалентной схемы модели для различных плавильных комплексов с ПИПП. Аналитическое исследование электромагнитных

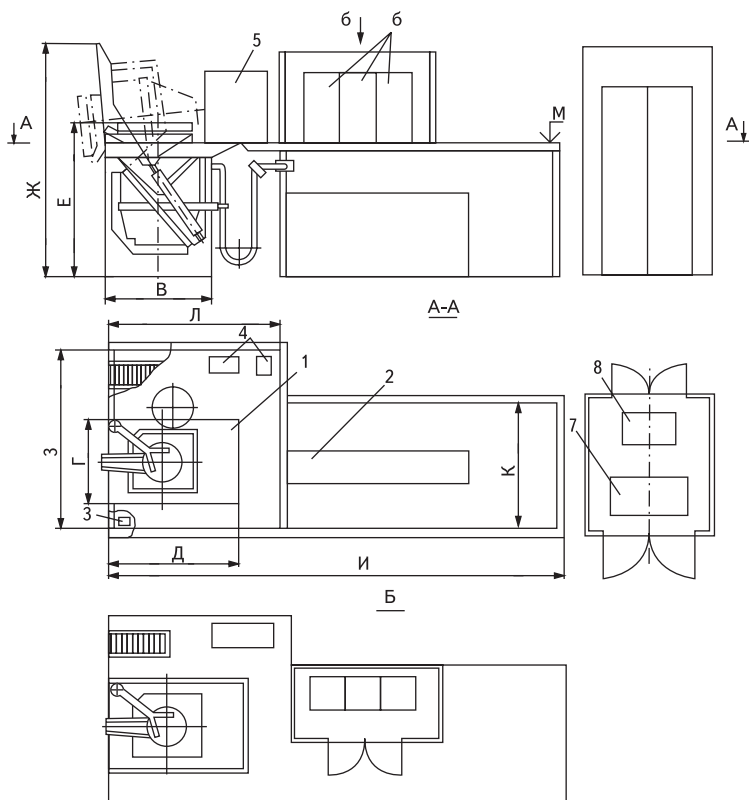


Рис. 1. Общий вид и размещение электропечей:

- 1 — электропечь индукционная;
- 2 — батарея конденсаторная с панелями управления;
- 3 — пульт управления;
- 4 — установка маслянапорная и гидروпанель;
- 5 — шкаф водораспределения;
- 6 — шкафы управления;
- 7 — трансформатор;
- 8 — реактор для печей с симметрирующим устройством

процессов в плавильных комплексах с ПИПП без серьезных упрощающих допущений практически невозможно или крайне затруднено. Моделирование (в том числе и в OtCAD) дает возможность рассмотрения объекта с конкретными наборами параметров элементов. Поэтому в данной статье будут рассмотрены только качественные результаты, полученные при моделировании. Эти результаты дают возможность оценить протекание электромагнитных процессов, а существующая модель позволяет для конкретных значений параметров получить требуемые режимы работы.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема плавильного комплекса с ПИПП, которая применялась при моделировании.

Силовое питание комплекса моделируется источником V1 типа VSIN (библиотека source.lib). Балластное сопротивление, которое работает только в момент пуска и после этого закорачивается электромеханическими коммутационными устройствами, представлено в виде сопротивления R1, ключа SW1 типа sw_tClose (библиотека anl_misc.olb) с сопротивлением в замкнутом состоянии RCLOSED, равным 0,01 Ом, которое компенсируется отрицательным сопротивлением R2 величиной -0,01 Ом. Таким образом, ключ SW1 в замкнутом состоянии имеет результирующее нулевое сопротивление. В разомкнутом состоянии сопротивление ключа ROPEN равно 1 МегОм.

В качестве регулирующих элементов применены тиристоры VT1, VT2 типа N5946F220 фирмы Westcode. PSpice-модель тиристора имеет следующий вид:

```
.subckt N5946F220          anode gate cathode
* "Typical" parameters
X1 anode gate cathode Scr params:
+Vdrm=2200v
+Vrrm=2200v
+Ih=1000ma
+Vtm=1.25v
+Itm=6000
+dvdt=1e9
+Igt=300ma
+Vgt=3.0v
+Ton=3u
+Toff=300us
+Idrm=200ma
* 07-6-4          Kurai
.ends
```

Данные вентили принадлежат к серии тиристоров, специально разработанных фирмой WESTCODE для фазного регулирования в низкочастотных синусоидальных цепях.

Управление тиристорами осуществляется от источников напряжения V2, V3 типа VPULSE. Параллельно тиристорам включена защитная цепочка C1, R3. Дроссель L1 и сопротивление R4 имитируют индуктивность подводящих шин и их активное сопротивление. Нагрузочный контур печи представлен индуктивностью L2, активным сопротивлением R5, компенсирующей емкостью C2 и сопротивлением R6, имитирующим потери в шинпроводах батареи компенсирующих конденсаторов.

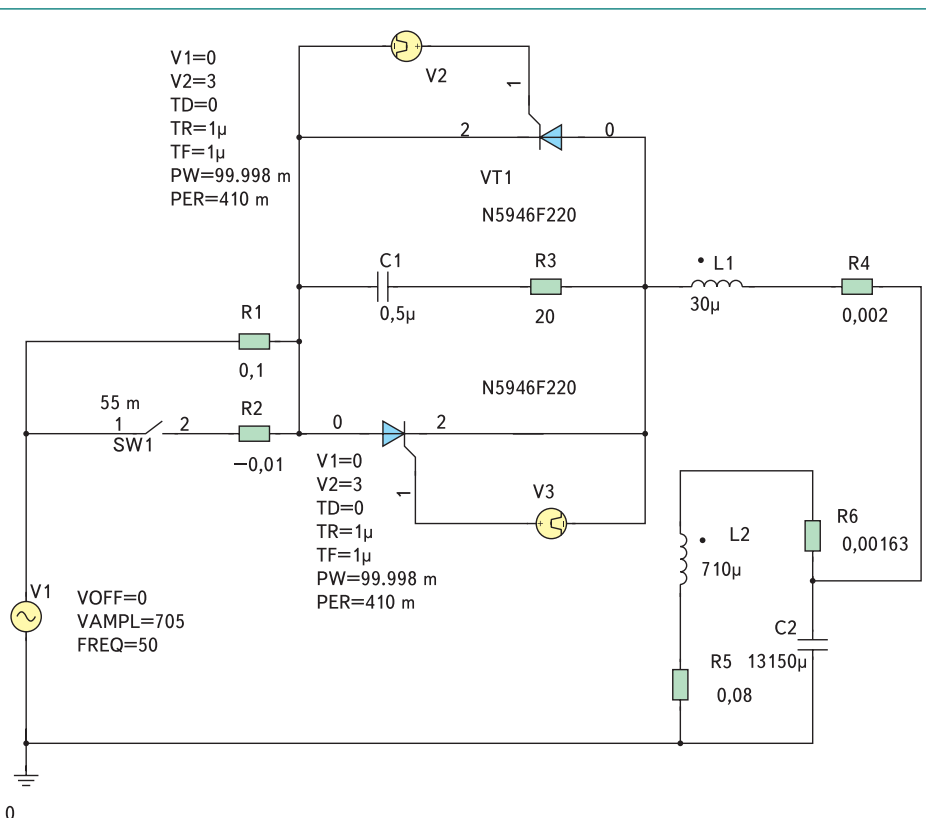


Рис. 2. Эквивалентная схема плавильного комплекса с ПИПП

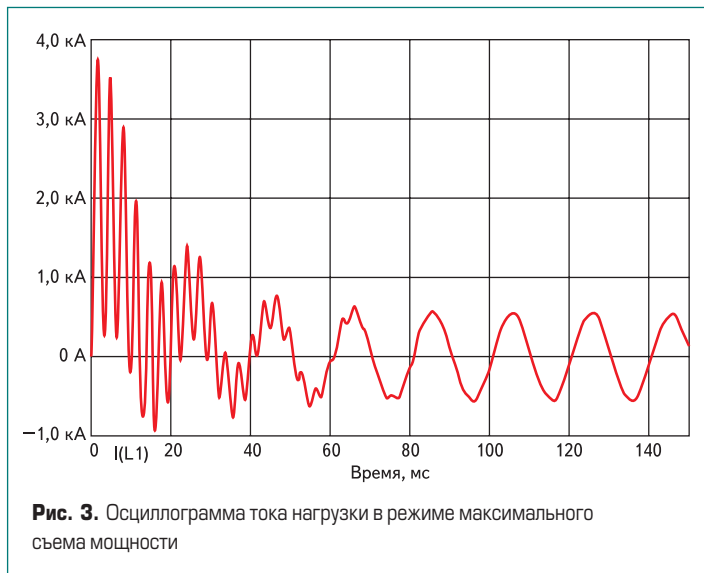


Рис. 3. Осциллограмма тока нагрузки в режиме максимальной схемы мощности

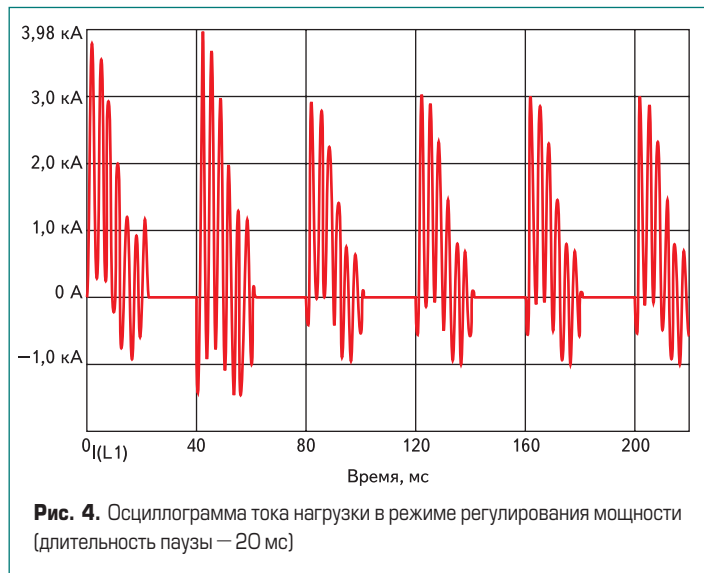


Рис. 4. Осциллограмма тока нагрузки в режиме регулирования мощности (длительность паузы — 20 мс)

Параметры нагрузочного контура, приведенные на схеме, при полностью открытых тиристорах соответствуют режиму работы плавильной установки на мощности 345 кВт.

В результате экспериментов с моделью было обнаружено следующее.

Характерным для данной схемы регулирования мощности ПИПП является возникновение затухающих колебаний повышенной частоты.

1. Минимальный начальный выброс тока при отпирании тиристорov достигается при включении его на нулевое напряжение, то есть в момент времени, когда синусоидальное входное напряжение равно нулю ($t = 0, 10, 20, \dots, 10n$ мс, где n — любое неотрицательное целое число).
2. Минимальный выброс напряжения на тиристорах при снятии с них импульсов управления обеспечивается при минимально возможном амплитудном значении тока, протекающего через них.
3. Нагрузочный контур, настроенный на резонанс при частоте 50 Гц, неэффективно возбуждается на повышенных частотах. Рассмотрим следующие режимы регулирования мощности в ПИПП.

1. Импульсы управления подаются на тиристоры в пределах соответствующих полу-волн синусоиды с регулируемым равным смещением относительно моментов времени $n \cdot 20$ мс и 10 мс + $n \cdot 20$ мс ($n = 0, 1, 2, \dots, N$; здесь N — любое целое число).
2. Импульсы управления подаются на тиристоры в моменты времени, всегда равные $n \cdot 20$ мс и 10 мс + $n \cdot 20$ мс ($n = 0, 1, 2, \dots, N$; здесь N — любое целое число). При этом регулирование осуществляется при постоянной длительности импульса управления, равной $m \cdot 20$ мс ($m = 1, 2, \dots, M$; здесь M — некоторое целое, постоянное при регулировании мощности), и переменной длительности паузы, равной $k \cdot 20$ мс ($k = 1, 2, \dots, K$; здесь K — некоторое целое, изменяемое при регулировании мощности).
3. Импульсы управления подаются на тиристоры в моменты времени, всегда равные $n \cdot 20$ мс и 10 мс + $n \cdot 20$ мс ($n = 0, 1, 2, \dots, N$; здесь N — любое целое число). При этом регулирование осуществляется при переменной длительности импульса управления, равной $m \cdot 20$ мс ($m = 1, 2, \dots, M$; здесь M — некоторое целое число, изменяемое при регулировании мощности), и постоянной дли-

тельности паузы, равной $k \cdot 20$ мс ($k = 1, 2, \dots, K$; здесь K — некоторое целое число, постоянное при регулировании мощности).

Режимы 2 и 3 являются разновидностью метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Заметим, что для упрощения системы управления тиристорами режимы 2 и 3 регулирования мощности могут быть реализованы при одновременной подаче импульсов управления на тиристоры. Естественно, что при этом первым включится тот тиристор, анодное напряжение которого положительно.

Анализ электромагнитных процессов в схеме, приведенной на рис. 2, проводился при значениях параметров элементов, выбранных с учетом следующих соображений:

- резонансный или близкий к резонансному режим работы нагрузочного контура L2, C2, R5;
- добротность индуктора Q в диапазоне 4–15 ($Q = \omega L/R$);
- переходные процессы пуска с балластным сопротивлением R1 и без него;
- действующее значение напряжение источника питания V1 — 500 В, частота — 50 Гц;



Рис. 5. Кривая тока нагрузки при включении тиристорov VT1 и VT2 в моменты времени, смещенные от нулевых значений напряжения на соответствующих тиристорах на 5 мс

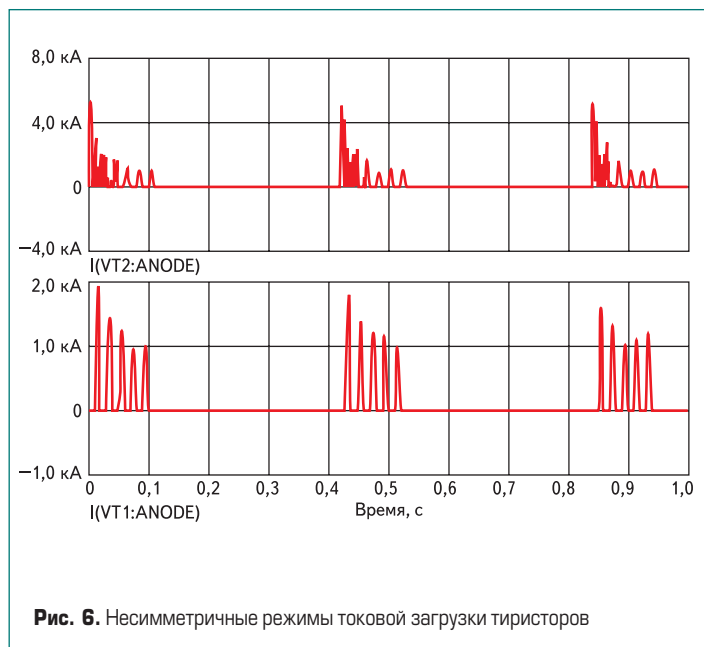


Рис. 6. Несимметричные режимы токовой загрузки тиристорov

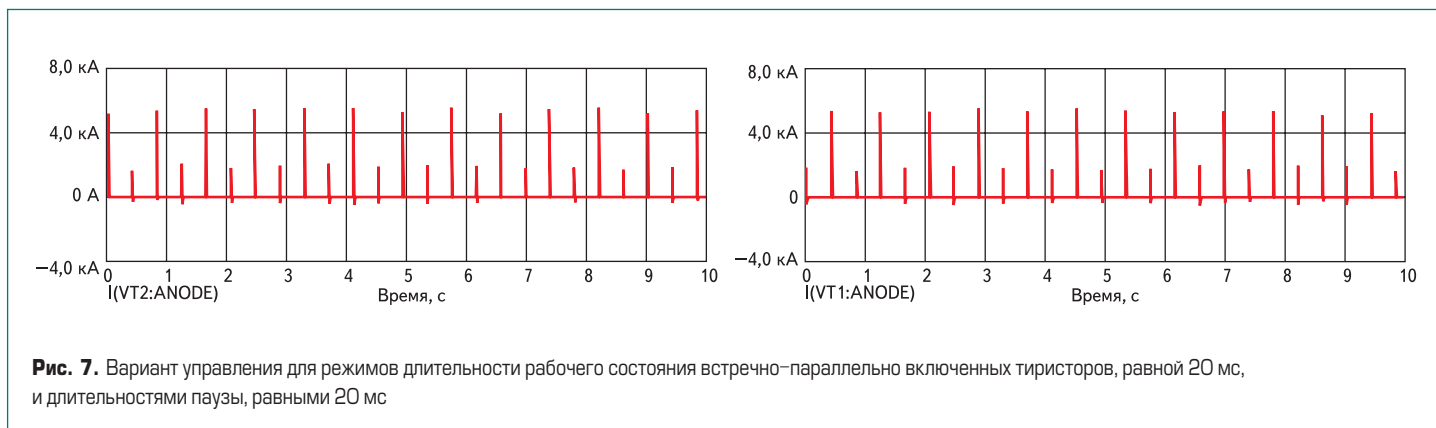


Рис. 7. Вариант управления для режимов длительности рабочего состояния встречно-параллельно включенных тиристорov, равной 20 мс, и длительностями паузы, равными 20 мс

- параметры импульсов управления в зависимости от приведенных выше режимов регулирования мощности и типа тиристора;
- режим максимальной мощности достигается при подаче на тиристоры управления, соответствующего постоянно включенному состоянию либо одного, либо другого тиристора.

Поскольку применяемые при анализе электромагнитных процессов модели тиристорov не предусматривают вычисление мощностей, выделяемых в корпусе прибора, эти мощности вычислялись как разность активной мощности, потребляемой от источника V1 и активной мощности, выделяемой в нагрузке, — R5, деленную на количество тиристорov в модели. Особенности вычисления средних и действующих значений переменных в OrCAD приведены в [2].

При моделировании выявлено следующее.

1. Если собственная частота колебаний последовательного контура V1, L1, C2 много выше 50 Гц, в начале переходного процесса нарастания тока нагрузки (ток через L1) каждого включения тиристора присутствует высокочастотная составляющая, время затухания которой определяется параметрами схемы. Поскольку резонансная частота нагрузочного контура равна 50 Гц, то этот контур практически не возбуждается высокочастотной составляющей тока нагрузки, что приводит к бесполезной нагрузке тиристорov по току. Степень этой нагрузки определяется режимом работы схемы (соотношением уровня 50 Гц составляющей к уровню высокочастотной составляющей, а также длительностью затухания высокочастотной составляющей тока нагрузки). Осциллограммы, иллюстрирующие данное положение, представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 приведена осциллограмма тока нагрузки в режиме максимального съема мощности, а на рис. 4 — в режиме регулирования мощности.
2. Наличие высокочастотной составляющей тока нагрузки нежелательно также потому, что может приводить к дополнительному нагреву компенсирующего конденсатора C2.
3. Снижение собственной частоты колебаний последовательного контура V1, L1, C2 за счет увеличения величины индуктивности L1 приводит к разгрузке тиристорov по току и снижению мощности, выделяемой в нагрузке. Это объясняется увеличением волнового сопротивления контура V1, L1, C2.

4. При подстройке нагрузочного контура L2, R5, C2 на резонансную частоту 50 Гц за счет изменения величины компенсирующей емкости C2 нужно принимать во внимание происходящее при этом изменение волнового сопротивления контура V1, L1, C2 и собственную частоту его колебаний.

5. При малых значениях L1, а также R4 и R6, включение тиристорov при любых отличиях от нуля напряжений приводит к увеличению пускового броска тока (включение контура V1, L1, C2 в момент времени, когда суммарное напряжение источника V1 и начальное напряжение на емкости C2 велико). Компенсация этого броска тока за счет пускового балластного сопротивления R1 возможна только для случая, когда бросок тока однократный (режим максимальной мощности). На осциллограмме (рис. 5) приведена кривая тока нагрузки при включении тиристорov VT1 и VT2 в моменты времени, смещенные от нулевых значений напряжения на соответствующих тиристорах на 5 мс (в этом режиме приняты следующие значения параметров схемы: L1 = 15 мкГн, R4 = 0,001 Ом, R6 = 0,000815 Ом). Данный режим приведен для иллюстрации возможности появления бросков токов через тиристоры при малых значениях индуктивности L1 и сопротивлений R4 и R6. Увеличение параметров этих элементов приведет к уменьшению (иногда очень существенному) первоначального броска тока. Однако пренебрежение возможностью появления режимов с большим первоначальным броском тока может привести к нежелательным последствиям.

6. Характерным для рассматриваемой схемы питания ПИПП является наличие несимметричных режимов токовой загрузки тиристорov (рис. 6).

Данные несимметричные режимы получены для модели, приведенной на схеме (рис. 2,) при подаче импульсов управления на тиристоры в нулевой момент времени с длительностью импульса управления 100 мс и периодом следования импульсов управления 420 мс.

При моделировании определено, что симметричные установившиеся режимы реализуются в следующих случаях:

- подача импульсов управления, обеспечивающих постоянное открытое состояние одного из встречно-параллельно включенных тиристорov (VT1, VT2 — рис. 2); вариант та-

кого управления — постоянное напряжение на управляющих электродах тиристорov;

- одновременная подача импульсов управления таким образом, что при этом обеспечивается их включение при одинаковых значениях соответствующих анодных напряжений; вариант такого управления для режимов длительности рабочего состояния встречно-параллельно включенных тиристорov, равной 20 мс, и длительностями паузы, равными 10 и 20 мс, проиллюстрированы на рис. 7 (соответственно правая и левая осциллограммы).

На рис. 7 представлен вариант управления мощностью ПИПП при симметричной токовой нагрузке тиристорov.

Изложенное дает возможность сделать следующие выводы:

1. Работа тиристорного регулятора в системе ПИПП предъявляет к нему специфические требования, которым серийно выпускаемые регуляторы в полном виде не соответствуют.
2. Фазное регулирование в пределах отрицательной и положительной полуволн одного периода промышленной частоты крайне нежелательно из-за возможных выбросов тока в моменты включения тиристорov и перенапряжений на них, а также ухудшения спектрального состава тока в конденсаторах компенсирующей батареи и сети.
3. При регулировании целесообразным представляется использование разновидности широтно-импульсной модуляции при включении тиристорov регулятора при нулевом значении питающего напряжения (начало синусоиды).
4. Наиболее рациональным является использование режима широтно-импульсной модуляции с постоянной длительностью импульса и регулированием длительности паузы. Для симметричной загрузки тиристорov регулятора по току тиристоры должны поочередно включаться на полуволны синусоиды различной полярности.

Литература

1. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. Часть 3 // Силовая электроника. 2005. № 22.
2. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование, «Поваренная» книга. 2005.