

# Схемотехнические и конструктивные решения преобразователей частоты для регулируемого электропривода

ТАРАТУТА И.П., ЧУПРИКОВ В.С.

*Рассмотрены основные схемотехнические решения преобразователей частоты для синхронных и асинхронных двигателей на напряжение 1 кВ и выше, принятые в разработках АО "Ансальдо-ВЭИ". Отмечены особенности конструкции преобразователей, вопросы управления и охлаждения силовых приборов.*

Частотно-регулируемый электропривод является одним из современных средств повышения эффективности работы и увеличения сроков службы оборудования предприятий. Особенно большой эффект дает внедрение преобразователей частоты (ПЧ) для двигателей средней и большой мощности, установленных на насосных и компрессорных станциях предприятий и городских служб, нефте- и газоперекачивающих станций, в электроприводе мощных агрегатов типа шаровых мельниц и т.д. Только за счет экономии электроэнергии срок окупаемости ПЧ в ряде случаев не превышает одного года, а с учетом экономии средств на ремонт электродвигателей и трубопроводов — и того меньше. Постоянный рост стоимости

электроэнергии определяет растущую потребность в таких ПЧ.

Последние достижения в области силовой электротехники и электроники позволяют сегодня реализовать ПЧ, обладающие возможностями, не достигимыми ранее. Появление новых быстродействующих силовых приборов — биполярных транзисторов с изолированной базой (Insulated Gate Bipolar Transistor — IGBT) и полностью управляемых тиристоров (Integrated Gate-Commutated Thyristor — IGCT) [1], обеспечило широкое внедрение принципов ШИМ-управления в ПЧ для асинхронных двигателей. С учетом прогресса в области микроэлектроники (наличие широкого спектра мощных сигнальных процессоров и

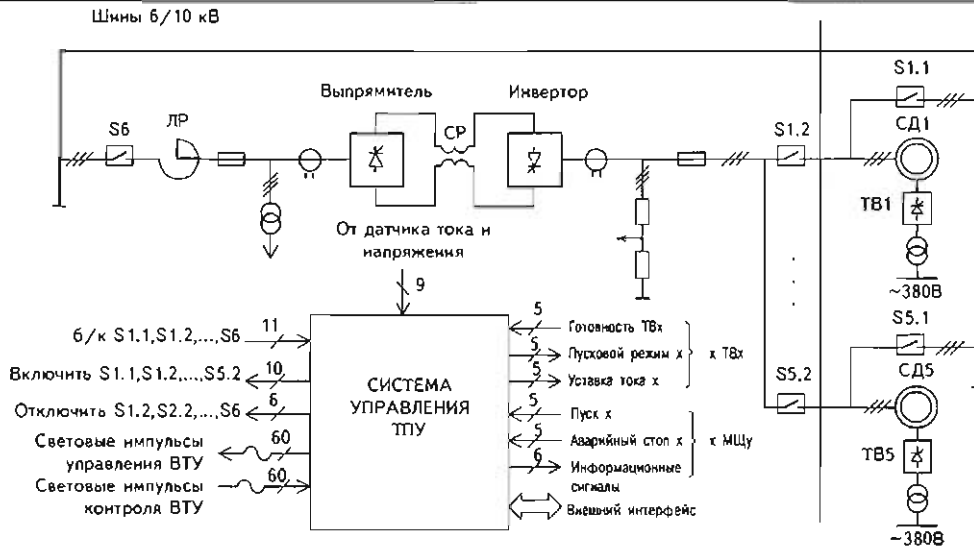


Рис.1. Схема тиристорного пускового устройства для пяти синхронных двигателей

ностью от 800 до 4000 кВт. Для плавного пуска таких СД оптимальным является тиристорное пусковое устройство (ТПУ), представляющее собой тиристорный преобразователь, реализованный по шестипульсовой схеме выпрямитель-инвертор со звеном постоянного тока. Схема ТПУ для пуска 5 СД, включающая все внешние и внутренние обменные сигналы, приведена на рис.1. Для ограничения токов КЗ на входе преобразователя устанавливаются линейные реакторы (ЛР), а в цепи постоянного тока — сглаживающий реактор (СР). Система управления ТПУ

программируемых логических матриц) это дает возможность создавать ПЧ с практически неограниченными функциональными возможностями.

Остановимся на рассмотрении основных схемотехнических решений преобразователей частоты для синхронных и асинхронных двигателей на напряжении выше 1 кВ, основываясь на опыте разработок АО "Ан-сальдо-ВЭИ".

### СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

#### Пусковые и пускоостановочные устройства

Пусковые устройства наиболее эффективно применяются на объектах, имеющих несколько синхронных двигателей (СД), работающих в едином технологическом цикле, например, на компрессорных станциях промышленных предприятий, особенно там, где по условиям энергосистемы двигатели обычно включаются один раз в неделю и работают на полную мощность независимо от потребности в сжатом воздухе. Регулирование давления в системе выполняется с помощью задвижек. Пусковое устройство, выполняющее поочередный пуск всех СД компрессорной станции, позволяет по мере необходимости отключать и снова включать двигатели практически неограниченное число раз, обеспечивая тем самым экономию электроэнергии.

На компрессорных станциях обычно используются синхронные двигатели на напряжение 6 и 10 кВ мощ-

путем изменения углов зажигания тиристоров, регулирования тока штатных тиристорных возбудителей (ТВ) и коммутации выключателей обеспечивает:

- плавный поочередный пуск 5 нагруженных синхронных электродвигателей;

- синхронизацию с питающей сетью частоты вращения электродвигателей и последующее их переключение на питание от промышленной сети 6/10 кВ.

Тиристорные пускоостановочные устройства (ТПОУ) отличаются от ТПУ только тем, что они допускают реверсивный режим работы. При этом обеспечивается регулируемое торможение двигателя с рекуперацией энергии маховых масс в питающую сеть. Силовая схема ТПОУ такая же, как в ТПУ, различие только в системе управления преобразователя.

#### Тиристорные преобразователи частоты

В случаях, когда требуется непрерывное регулирование частоты вращения СД, применяются тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ). Возможны два схемных решения.

В первом случае, схема ТПЧ аналогична шестипульсовому ТПУ. Такие ТПЧ применяются для двигателей, допускающих загрузку обмоток статора высшими гармониками, т.е. для специальных вентильных двигателей либо для обычных двигателей, мощность которых может быть снижена на 20—25% от номинальной.

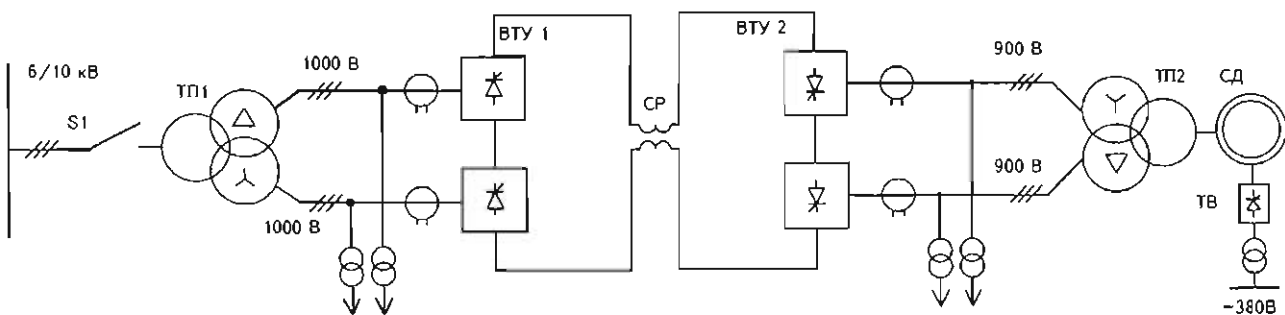


Рис.2. Схема 12-пульсного тиристорного преобразователя частоты для стандартного синхронного двигателя на напряжение 6/10 кВ



Рис.3. Высоковольтное тиристорное устройство ТПУ для двигателей мощностью 3150 кВт на напряжение 10 кВ

Во втором случае, когда обычный СД должен иметь возможность длительно работать с полной электрической нагрузкой, оптимальным решением является использование 12-пульсной схемы с трехобмоточными трансформаторами на входе и выходе преобразователя. Пример схемы такого ТПЧ приведен на рис.2.

В основу конструкции тиристорных ПЧ положен модульный принцип построения. Два (или четыре для 12-пульсного ТПЧ) преобразовательных моста, а также ограничители перенапряжения, предохранители, дроссели насыщения, измерительные датчики тока и напряжения и устройства системы светового управления размещаются в единой конструкции, называемой высоковольтным тиристорным устройством (ВТУ).

Каждый преобразовательный мост состоит из 6 тиристорных вентилей, содержащих один или несколько соединенных последовательно тиристоров, демпфирующие RC-цепочки и ячейки управления тиристоров. Число тиристоров в вентиле зависит от рабочего напряжения ПЧ. Для ТПЧ с трансформаторами на входе и выходе уровень переменного напряжения лежит в пределах 800 – 2200 В и выбирается исходя из параметров используемых тиристоров для оптимизации режима их работы.

Питание ячеек управления тиристоров осуществляется по кабельному каналу от специального высокочастотного источника питания, связь ячеек управления тиристоров с системой управления ТПУ выполняется с помощью волоконно-оптических световодов, обеспечивающих гальваническую развязку сигналов и высокую помехоустойчивость каналов управ-



Рис.4. Тиристорный преобразователь частоты с водяным охлаждением для двигателя мощностью 6300 кВт на напряжение 2 кВ

ления и контроля. Для повышения надежности ПЧ в ряде применений целесообразно применить дублирование каналов управления.

В зависимости от вида ПЧ используются три способа охлаждения тепловыделяющих элементов — тиристоров, резисторов демпфирующих цепей и дросселей насыщения: для ТПУ — естественное воздушное, для ТПЧ — в зависимости от требований заказчика принудительное воздушное или водяное. При принудительном воздушном охлаждении в качестве теплоотводов используются охладители на водяных трубках. При водяном охлаждении ПЧ используются комплекты системы охлаждения деионизированной водой с теплообменными агрегатами, выполненными, в зависимости от местных условий, по схеме "вода-вода" или "вода-воздух".

На рис.3. приведены ВТУ пускового устройства для двигателей мощностью 3150 кВт на напряжение 10 кВ, на рис.4 — два ВТУ преобразователя частоты для двигателя мощностью 6300 кВт на напряжение 2 кВ с системой водяного охлаждения.

### АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Для асинхронных двигателей принципиально невозможно использование в инверторах обычных тиристоров, так как статорная обмотка двигателя не генерирует ЭДС, необходимую для обеспечения их запираания. До последнего времени такие инверторы строились на запираемых тиристорах. Недостатком их использования были большие динамические потери и необходимость в громоздких цепях выключения тока.

С появлением мощных IGBT и позднее полностью управляемых тиристоров IGCT этот недостаток был ликвидирован и стало возможным реализовать инверторы напряжения по многоуровневым схемам с ШИМ-управлением с частотой модуляции 500–800 Гц. Наибольшее распространение в мире получила схема трехуровневого инвертора, называемая NPC (neutral point clamp) [2], позволяющая при использовании приборов класса напряжения 4,5 кВ реализовывать преобразователи на напряжение до 4,2 кВ без использования трансформаторов.

На рис.5 приведена схема ПЧ на базе трехфазного неуправляемого диодного выпрямителя с емкостным накопителем и автономного трехуровневого инвертора напряжения с широтно-импульсным управлением. Этот преобразователь разработан и изготовлен в АО "Ансальдо-ВЭИ" и предназначен для непрерывного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя на напряжение 3 кВ и мощность 1000 кВт.

ПЧ включает в себя линейный реактор, диодный выпрямитель, инвертор напряжения и выходной фильтр. Линейный реактор предназначен для ограничения тока КЗ и снижения уровня перенапряжений на выпрямителе. Повышающий трансформатор  $T$  с диодным выпрямителем во вторичной обмотке, подключенный к сети 220 В через магнитный пускатель  $MP$  и токоограничивающий резистор, обеспечивает плавный заряд емкостного накопителя  $C1-C6$  до подачи высокого напряжения. Три фазы инвертора формируют на выходе преобразователя трехфазное напряжение с регулируемой частотой и амплитудой. Инвертор реализован на 12 IGCT-приборах  $V1-V12$  по NPC схеме, обеспечивающей 3 уровня выходного напряжения в каждой фазе и, соответственно, 5 уровней линейного напряжения. Выходной LC-фильтр улучшает

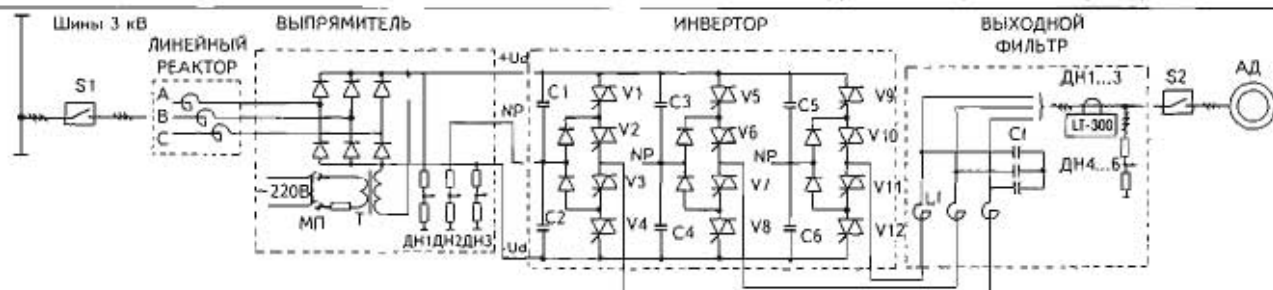


Рис.5. Схема преобразователя частоты для асинхронного двигателя напряжением 3 кВ

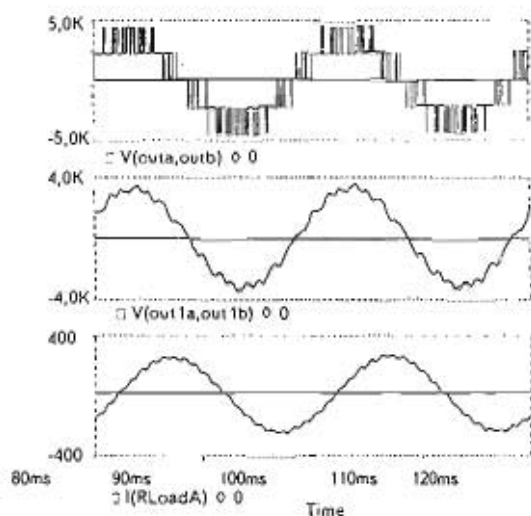


Рис.6. Временные диаграммы выходного линейного напряжения инвертора, напряжения и тока нагрузки

форму выходного напряжения ПЧ и снижает уровень  $du/dt$  на обмотках двигателя. На рис.6 приведены временные диаграммы работы инвертора.

Наибольший интерес представляет конструкция инвертора, реализованного в шкафом исполнении. Шкаф инвертора состоит из трех одинаковых секций, в каждой из которых смонтировано оборудование од-



Рис.7. Шкаф инвертора

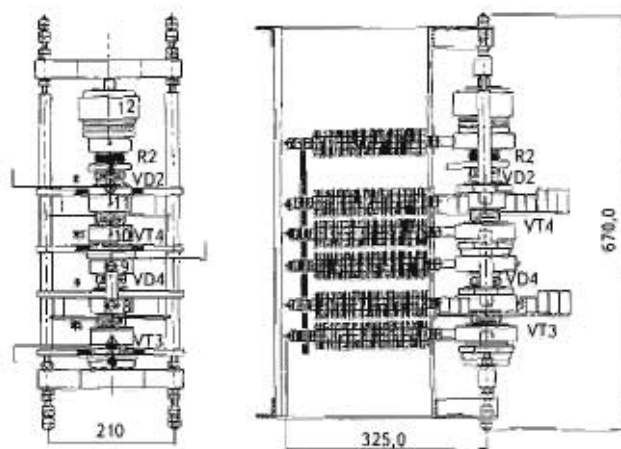


Рис.8. Зажимное устройство полуфазы NPC инвертора на IGBT

ной фазы. В средней секции расположена также система управления ПЧ. В нижней части каждой секции установлен вентилятор принудительного воздушного охлаждения, над которым располагается вентиляционный короб (рис.7).

К конструкции инвертора предъявляются особые требования в части обеспечения минимальной индуктивности силовых цепей. С этой целью шины постоянного напряжения выполнены в виде "сэндвича" с твердой изоляцией, проходящего через все три секции. Силовые элементы каждой фазы зажаты в два столба вместе с охладителями на водяных трубках, радиаторы которых фиксируются в изоляционном вентиляционном коробе. Конструкция зажимного столба показана на рис.8. В качестве резистора демпфирующей RLD цепочки используются низкоиндуктивные полупроводниковые резисторы типа РК143 прижимной конструкции (разработка ВЭИ), зажатые в том же столбе. Низкоиндуктивные накопительные и демпфирующие конденсаторы размещаются по обе стороны вентиляционного короба.

#### Список литературы

1. Ковалев Ф.И., Флоренцев С.Н. Анализ и прогноз развития приборной силовой электроники на рубеже столетий// Сборник докладов V симпозиума "Электротехника 2010 год", Т.2. М., 1999.
2. Zuckerberger A. и др. Design, simulation and realization of high power NPC converters equipped with IGBTs// IEE-IAS, St Louis, Oct.12-16. 1998.