

ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ КОМПЛЕКТНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА 6300 кВт

Кандидаты техн. наук **И.П. Таратута, В.С. Чуприков**
АО "Ансальдо-ВЭИ", Москва

В 1999 г. АО "Ансальдо-ВЭИ" по заказу ОАО "Газпром" приступило к разработке и изготовлению тиристорного преобразователя частоты типа ТПЧ-6,3 (далее ТПЧ) для комплектного регулируемого электропривода мощностью 6300 кВт с номинальной частотой вращения $n_{ном} = 3000 \text{ мин}^{-1}$ – КРЭП-6300. ТПЧ должен обеспечивать плавный разгон, длительную непрерывную работу в диапазоне частот $(0,6 \dots 1,05)n_{ном}$ и рекуперативное торможение синхронного электродвигателя (СД) в составе привода центробежного нагнетателя электроприводного газоперекачивающего агрегата ЭПА-6300 на станции подземного хранения газа (ПХГ) Песчаный Умет (Саратовская обл.). Предусмотрена работа электропривода в режиме электрогенератора с выдачей энергии в сеть.

Разработку и изготовление специального двухобмоточного СД с бесщеточным возбуждением, а также комплектную поставку КРЭП-6300 осуществляет АО "Привод" (г. Лысьва).

В настоящее время все оборудование ТПЧ изготовлено и проходит испытания на стендах АО "Ансальдо-ВЭИ".

Особенности ТПЧ-6,3

Рассчитанный на питающую сеть с номинальным напряжением 10 кВ и частотой 50 Гц, ТПЧ сохраняет номинальную мощность (6300 кВт) при отклонениях напряжения $\pm 10\%$ и частоты $\pm 2,5\%$ от указанных значений, допускает перегрузку по току до $1,25 I_{ном}$ в течение 1 мин.

Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах 10 кВт питающей сети, обусловленный работой преобразователя в рабочем диапазоне частот вращения СД $(0,6 \dots 1,05)n_{ном}$, не превышает 4% (в соответствии с ГОСТ 13109-97) при работе КРЭП как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.

В ТПЧ предусмотрена возможность рекуперации энергии электродвигателя при аварийном торможении.

ТПЧ обеспечивает:

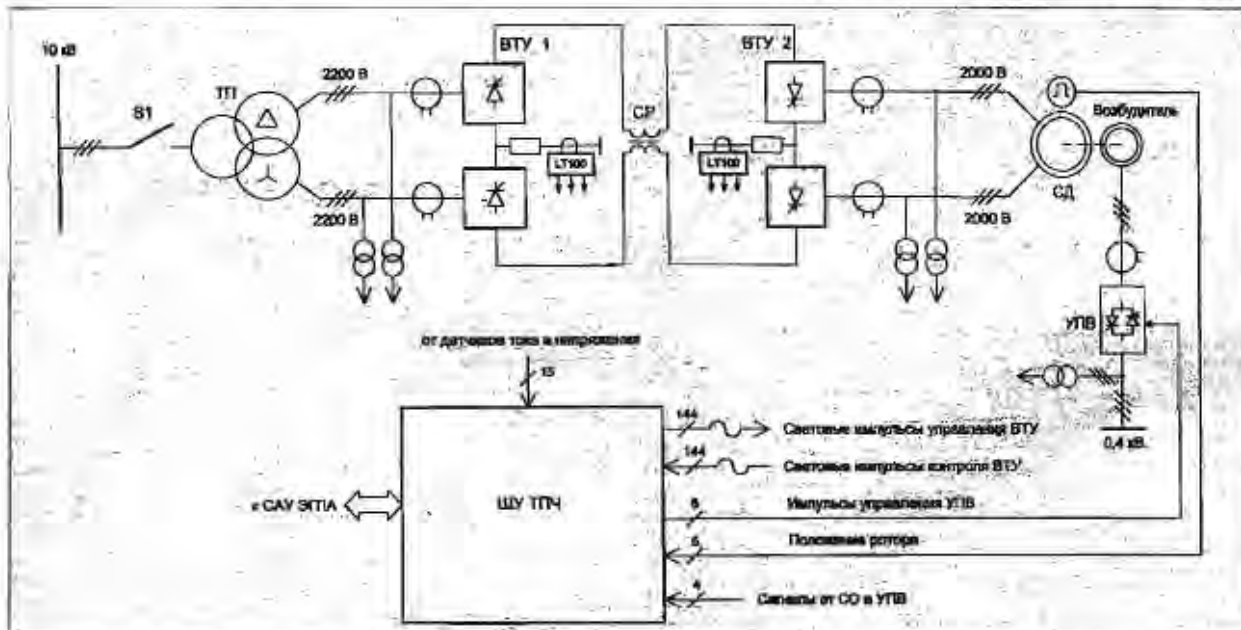
- работу КРЭП-6300 в режимах двигателя и генератора; режим работы – продолжительный (S1 по ГОСТ 183-74);
- автоматический пуск электродвигателя с нагрузкой из состояния останова до заданной частоты.

В ТПЧ предусмотрена возможность рекуперации энергии электродвигателя при аварийном торможении.

ТПЧ обеспечивает:

- работу КРЭП-6300 в режимах двигателя и генератора; режим работы – продолжительный (S1 по ГОСТ 183-74);
- автоматический пуск электродвигателя с нагрузкой из состояния останова до заданной частоты.

Рис. 1. Однолинейная электрическая схема ТПЧ-6,3



**ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ,
ВХОДЯЩЕГО В СОСТАВ КРЭП-6300**

Синхронный электродвигатель

Номинальная мощность (на валу), кВт	6300
Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	3000
Номинальное напряжение на статоре, В	2 × 2000
Номинальная сила тока статора, А	1044
Коэффициент полезного действия, %	97,2
Коэффициент мощности	0,9
Маховый момент ротора, кг·м ²	760
Рабочий диапазон частоты вращения	(0,6...1,05)n _{ном}

Устройство бесщеточного возбуждения – возбуждатель (на основе асинхронной машины с трехфазными статором и ротором) в номинальном/пусковом режимах

Напряжение выпрямленное, В	134/65,5
Сила выпрямленного тока, А	281/138
Напряжение на статоре, В	94/330
Сила тока статора, А	77/188
Частота, Гц	
статора	50/50
ротора	450/50

Привод

Зависимость суммарного (совместно с редуктором и нагнетателем) момента сопротивления ЭГПА-6300 от частоты вращения	Близка к квадратичной
Момент трогания нагнетателя, Н·м	2019
Приведенный к валу двигателя суммарный маховый момент ЭГПА (без СД), кг·м ²	275

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО



ПРИВОД

Россия, 618960, Пермская обл.,
г. Лысьва, ул. Пожарского, 8
Телефон: (34249) 2-21-20, 2-21-81
Факс: (34249) 2-54-81, 2-02-26
E-mail: privod@permonline.ru

тоты вращения с последующим ее регулированием в соответствии с заданием, поступающим от системы автоматического управления ЭГПА (САУ ЭГПА), число пусков и интервалы между ними не ограничиваются;

- ограничение силы тока СД значением $1,25I_{ном}$ в течение 1 мин, а при больших длительностях – $I_{ном}$;

- устойчивую длительную работу электродвигателя в рабочем диапазоне частоты вращения $(0,6...1,05)n_{ном}$ с отклонением не более 1 %.

Уровень автоматизации ТПЧ позволяет работу без постоянного присутствия персонала по командам от САУ ЭГПА.

Система управления ТПЧ – цифровая, построена на базе микропроцессоров и обеспечивает управление, контроль, диагностирование и защиту преобразователя.

Все оборудование ТПЧ за исключением трансформатора и реакторов размещается в контейнере.

Электрическая схема

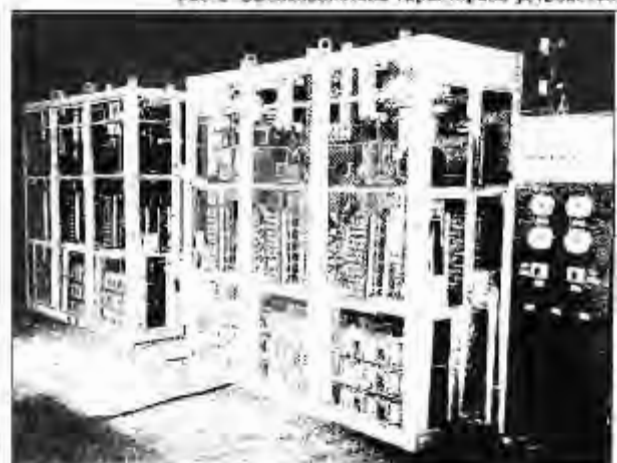
Для снижения уровня высших гармоник преобразователь выполнен по 12-ти импульсной схеме с последовательным включением мостов (рис.1). В состав ТПЧ входят:

- входной трехобмоточный преобразовательный трансформатор ТП;
- преобразователь, состоящий из двух одинаковых высоковольтных тиристорных устройств ВТУ 1 и ВТУ 2;
- сглаживающий реактор СР;
- устройство питания возбуждателя двигателя УПВ;
- шкаф управления (ШУ) ТПЧ;
- воздушно-жидкостная система охлаждения СО тепловыделяющих элементов силовой схемы.

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой ТПЧ из сети 10 кВ, на шинах ТП установлено **фильтрокомпенсирующее устройство**.

Преобразовательный трансформатор – масляный, в исполнении для наружной установ-

Рис. 2. Высоковольтное тиристорное устройство



ю. Номинальная мощность – 8 800 кВА, напряжение на обмотках ВН – 10 кВ, на обмотках НН – 2,2 кВ, напряжение короткого замыкания – 12 %.

Сглаживающий реактор – двухсекционный с воздушным охлаждением в исполнении для установки на открытом воздухе или под навесом. Суммарная индуктивность реактора при согласном включении обмоток с учетом взаимоиндукции – 12 мГн, номинальная сила тока – 1350 А.

Остальное оборудование разработано специально для ТПЧ-6,3.

Нестандартное комплектующее оборудование

Высоковольтное тиристорное устройство (ВТУ) содержит два последовательно включенных преобразовательных моста, а также измерительные датчики силы тока и напряжения, предохранители и оксидно-цинковые ограничители перенапряжения. Внешние шинные электрические выводы ВТУ в верхней части устройства подключены к проходным изоляторам, установленным на крыше контейнера.

ВТУ представляет собой шкаф с сетчатыми стенками (рис.2), конструкция которого предусматривает двустороннее обслуживание. Габаритные размеры ВТУ – 2400 × 1000 × 2400 мм, масса – не более 2200 кг.

Преобразовательный мост ВТУ состоит из шести тиристорных вентилей, каждый из которых содержит три (один из них – избыточный) последовательно соединенных тиристора типа T273-T250, рассчитанных на силу тока 1250 А и напряжение 4,2 кВ, токоограничивающие анодные реакторы и демпфирующие RC-цепочки. Охлаждение тиристорных, демпфирующих резисторов и реакторов осуществляется деионизованной водой, что позволило существенно упростить и облегчить конструкцию по сравнению с устройством, имеющим воздушную СО.

Управление каждым тиристором осуществляется от двух работающих параллельно ячеек, находящихся на потенциале тиристора. Связь ячеек управления (ЯУ) с ШУ ТПЧ осуществляется по индивидуальным световодам, что обеспечивает гальваническую развязку и высокую помехозащищенность цепей управления и контроля. ЯУ питаются по кабельному каналу от двух импульсных блоков питания.

Высокие показатели надежности ТПЧ обеспечивают следующие конструктивно-технические особенности:

- резервирование ключевых элементов – тиристоров, ЯУ и блоков их питания;
- непрерывный контроль их состояния;
- использование световых каналов управления и контроля;
- применение водяной СО, снижающей температуру корпуса тиристорных и повышающей срок их службы;
- блочная структура построения ВТУ, позволяющая заменить любой вышедший из строя элемент за время не более 1 ч.

ТПЧ-6,3

Номинальная мощность*, кВт	6300
Коэффициент мощности**	0,9 – 1,0
Коэффициент полезного действия, %, не менее:	
в номинальном режиме	97
в рабочем диапазоне регулирования	95
Средняя наработка на отказ, ч, не менее	10 000
Коэффициент готовности	0,995
Вероятность успешного пуска	0,995

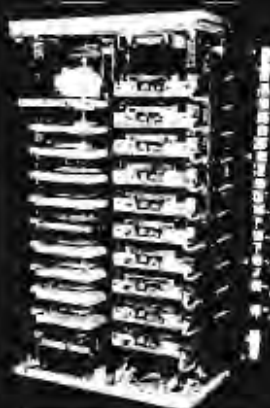
* при температуре окружающей среды +40 °С и давлении 1 атм (= 0,1 МПа)

** во всем диапазоне рабочих частот вращения



ANSALDO-VEI

АО "Ансальдо-ВЭИ"
Россия, 111250, Москва,
Красноказарменная, 12
Тел./факс: (095) 361 91 63,
273 43 91, 361 9056
E-mail: avei@online.ru
http://www.avei.ru



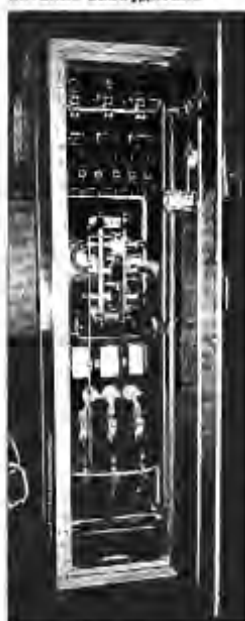
- Частотный регулируемый привод для асинхронных и синхронных электродвигателей
- Пусковые и пускоостановочные устройства электродвигателей
- Статические тиристорные компенсаторы
- Высоковольтные тиристорные выпрямители для передач и вставки постоянного тока
- Специальные источники питания

В случае выхода из строя силового тиристора, световода, ЯУ или блока ее питания ТПЧ может работать практически неограниченное время; при этом тип и номер отказавшего элемента индицируется на табло ШУ ТПЧ и передается в САУ ЭГПА.

Устройство питания возбуждателя (УПВ) представляет собой бестрансформаторный трехфазный тиристорный регулятор напряжения, питающийся от фидера 3×380 В. Номинальная мощность УПВ – 10 кВт, в пусковом режиме – 40 кВт.

Формирование импульсов управления УПВ, регулирование напряжения и защиты по току и напряжению выполняет ШУ ТПЧ.

Рис. 3. Устройство питания возбуждателя



УПВ содержит шесть тиристоров с водяным охлаждением, демпфирующие цепочки и шесть формирователей, обеспечивающих гальваническую развязку и усиление импульсов управления тиристорами, поступающих от ШУ ТПЧ, а также измерительные датчики силы тока и напряжения, предохранители и ограничители перенапряжения.

Конструктивно УПВ выполнен в виде шкафа с односторонним обслуживанием (рис. 3). Габаритные размеры 610 × 460 × 1900 мм, масса – не более 100 кг.

Система охлаждения – воздушно-жидкостная. Первичный контур –

воздушный, вторичный (связанный непосредственно с ВТУ) – жидкостный (деионизованный водный раствор этиленгликоля).

Техническая характеристика системы охлаждения

Мощность отводимых потерь, кВт	75
Максимально допустимая температура охлаждающей жидкости, °С:	
на входе ВТУ	55
на выходе ВТУ	62
Максимально допустимое избыточное давление жидкости на входе в ВТУ, МПа	0,5
Расход охлаждающей жидкости, м ³ /ч	12,5
Удельное электрическое сопротивление жидкости, МОм·см, не менее	1,0

Гидравлическая схема системы охлаждения ТПЧ (рис. 4) содержит два насоса Н1 и Н2 (один из них – резервный), теплообменник ТО, напорный бак НБ, ионообменный фильтр ИОФ, запорную арматуру и контрольно-измерительные приборы (струйные реле СР1 и СР2; манометр М; термометры Т1–Т2; кондуктомер КМ). Система охлаждения имеет пульт управления, обеспечивающий ее включение, отключение, защиту и сигнализацию.

Все оборудование СО, кроме теплообменника жидкость-воздух, смонтировано на несущей раме (рис. 5). Габаритные размеры СО – 2000 × 800 × 2500 мм, масса – не более 800 кг. ТО, состоящий из шести одинаковых секций размером 900 × 600 × 900 мм общей массой 950 кг, размещается в неотпливаемом отсеке контейнера.

Система управления ТПЧ (рис. 6) включает систему управления, регулирования, защиты и автоматики ТПЧ (СУРЗА), а также систему светового управления тиристорами.

Система светового управления ТПЧ состоит из двух одинаковых блоков светового управления (БСУ), расположенных в ШУ ТПЧ вместе с СУРЗА на потенциале земли, 144-х ячеек управления, расположенных в ВТУ и имеющих потенциал управляемого ими тиристора, и 288-ми световодов управления и контроля, обеспечивающих гальваническую развязку цепей БСУ и ЯУ.

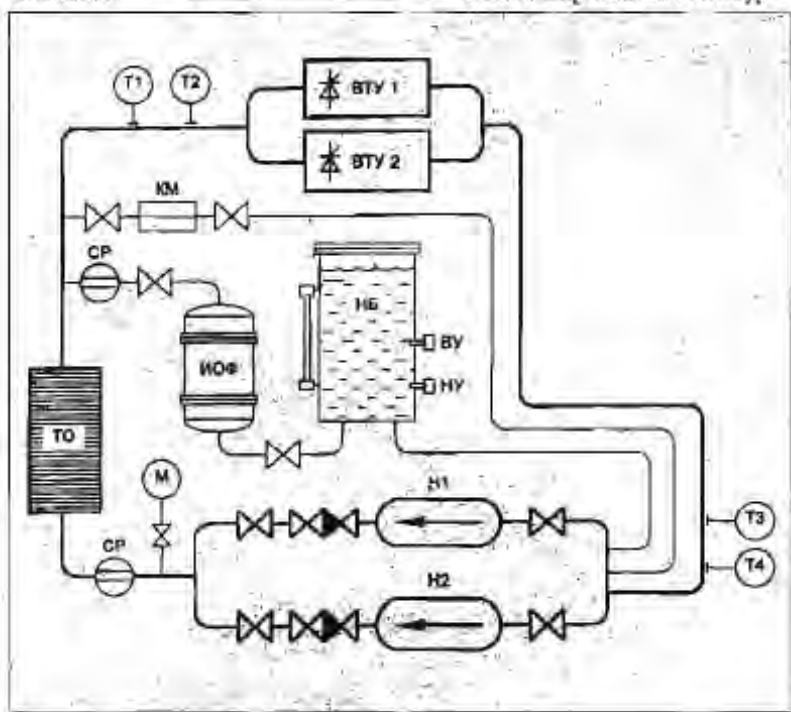
Управление каждым тиристором и контроль за его работой осуществляют две ячейки управления, работающие параллельно и питающиеся с потенциала земли раздельно по двум кабельным каналам от двух независимых блоков питания ячеек (БПЯ). Всего ВТУ содержит четыре БПЯ – по два на каждый мост.

Каждый БСУ управляет одним ВТУ и состоит из 12-ти одинаковых плат управления ПУ (по одной на каждый вентиль) и платы защиты ПЗ.

Плата управления выполняет следующие функции:

- формирование световых импульсов управления одновременно для всех тиристоров вентиля по сигналам СУРЗА;
- реализацию следящего принципа управления, обеспечивающего формирование дополнительных импульсов управления при обрыве тока вентиля в зоне длительности импульса СУРЗА;

Рис. 4. Гидравлическая схема системы охлаждения



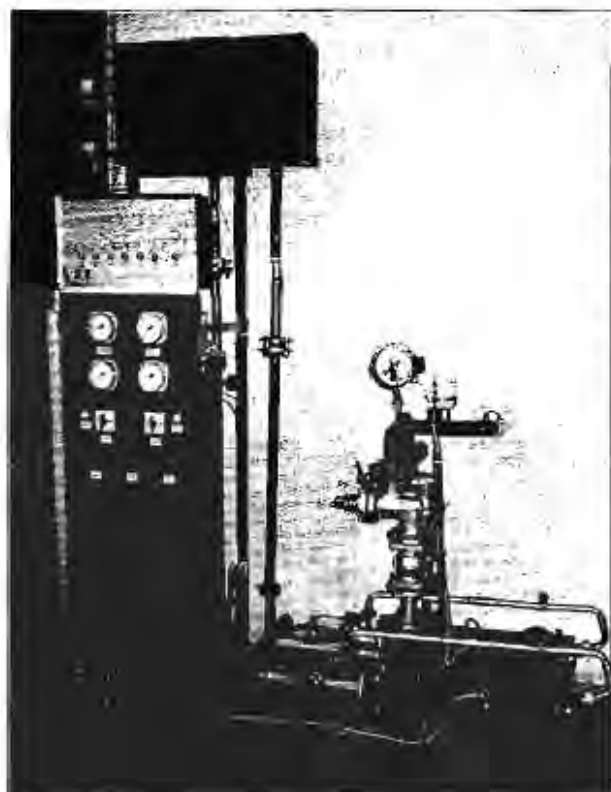


Рис. 5. Система охлаждения

- непрерывный контроль состояния трех тиристоров и шести каналов управления вентилем;
- формирование сигналов неисправности при пробое тиристора или отказе канала управления с индикацией номера отказавшего устройства.

Плата защиты осуществляет следующие функции:

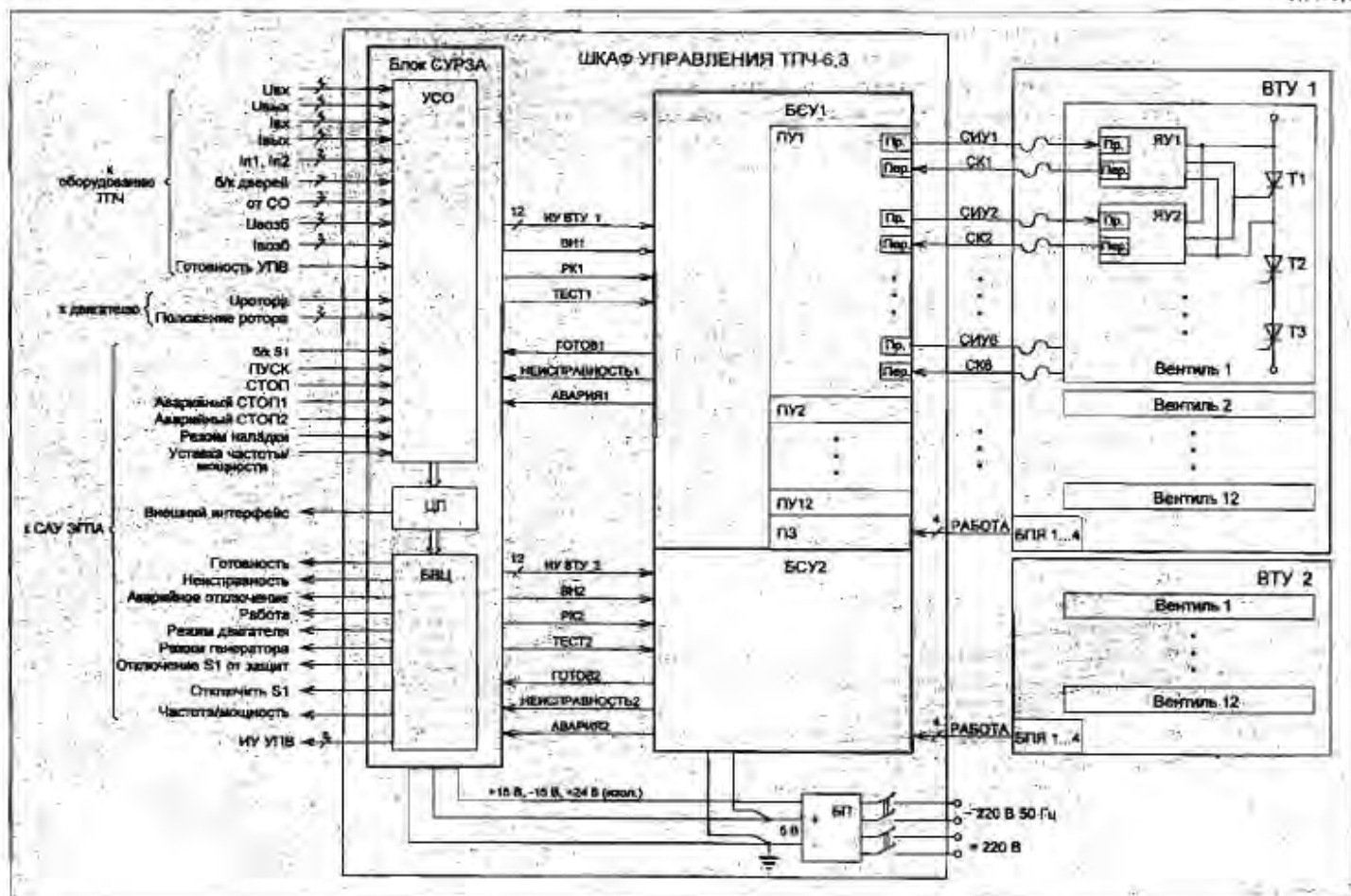
- непрерывный контроль работы четырех БПЯ;
- обеспечение режима тестовой проверки каналов управления до подачи высокого напряжения на ТПЧ;
- формирование сигналов готовности, неисправности и аварии ВТУ, направляемых в СУРЗА.

Цифровая система управления, регулирования, защиты и автоматики выполнена на основе сигнального процессора ADSP-2181 (время операции 10-30 нс) и программируемой логической матрицы Xilinx "Spartan" XCS40 (244 вывода, 30 тыс. логических вентилей).

Управление – векторное, по встроенной модели СД, которая определяет текущие значения всех переменных параметров СД в реальном масштабе времени. Удержание модели в синхронизме с объектом обеспечивается обратными связями по измеряемому переменным. Период съема информации (длительность цикла расчета) – 200 мкс

СУРЗА содержит три связанных между собой основных контура регулирования:

Рис. 6. Структурная схема системы управления ТПЧ-6,3



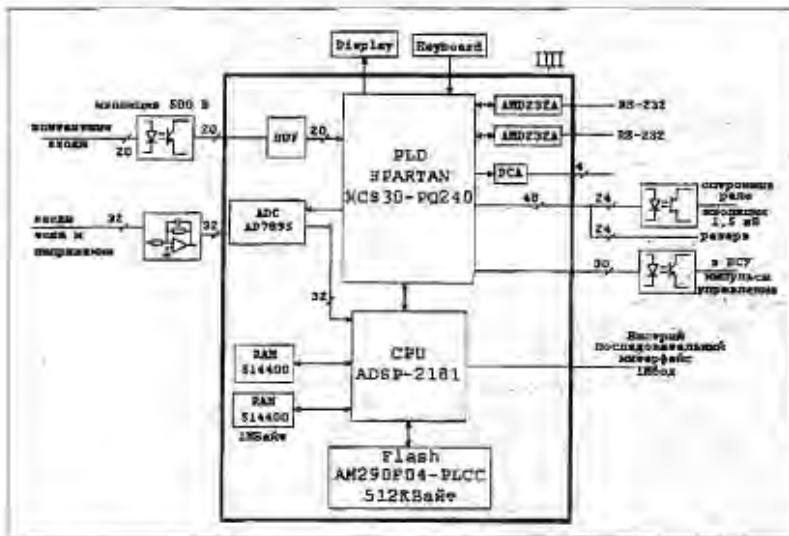


Рис. 7. Функциональная схема СУРЗА

- на выпрямителе – регулятор силы постоянного тока;
- на инверторе – регулятор угла погасания с регулятором минимальной силы тока, обеспечивающим устойчивую работу преобразователя при посадках напряжения на СД;
- на возбuditеле – регулятор постоянного поля СД (уставка поля пропорциональна частоте вращения СД).

Связь с верхним уровнем управления осуществляется заданием САУ ЭГПА уставки частоты вращения СД в режиме двигателя и уставки передаваемой в сеть мощности в режиме генератора, а также передачей текущих значений этих же параметров от СУРЗА в САУ. Кроме того, предусмотрен постоянный обмен информацией между САУ ЭГПА и СУРЗА по последовательному интерфейсу.

Система автоматики осуществляет программный плавный пуск и останов ЭГПА по командам САУ, а также аварийный останов как по команде САУ, так и при срабатывании внутренних защит ТПЧ. Предусмотрен режим торможения СД с рекуперацией в питающую сеть энергии маховых масс электропривода, который может возникнуть в исключительных случаях, когда появляется опасность повреждения ЭГПА.

Система защиты реализует 16 основных видов защит, обеспечивающих надежное отключение ТПЧ в аварийных ситуациях и при отказах оборудования.

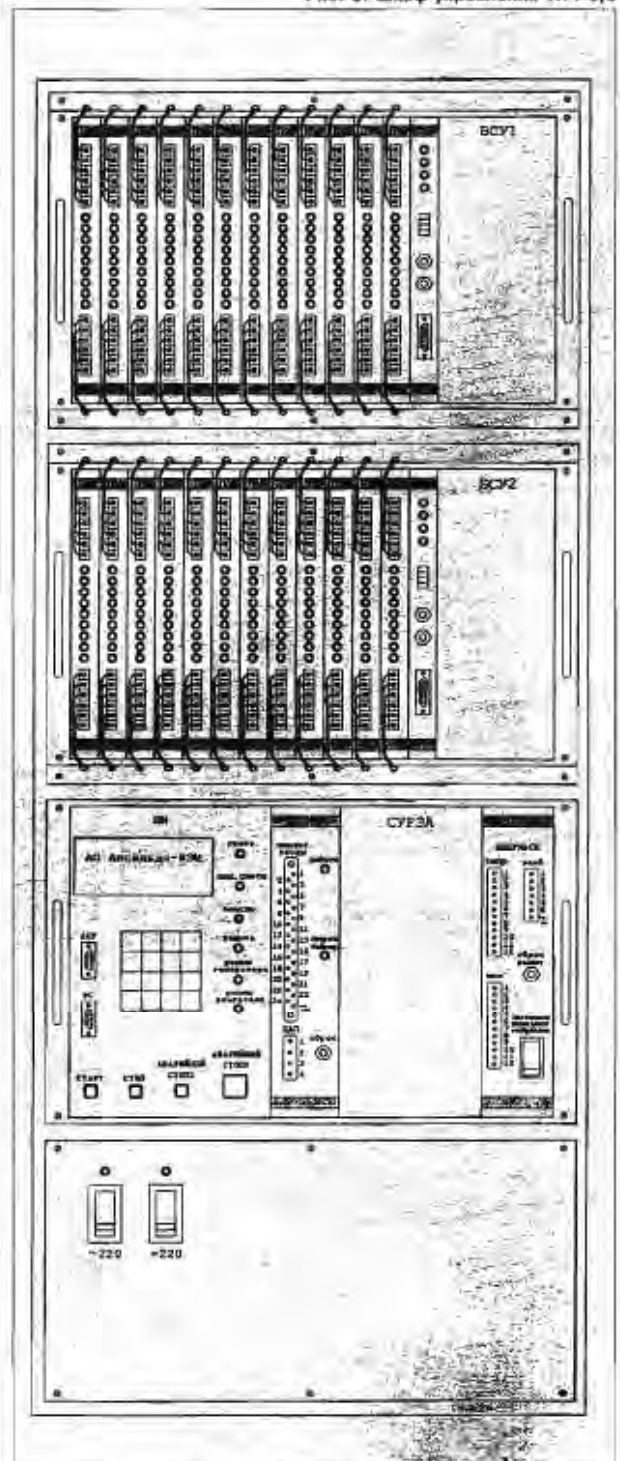
Система контроля, диагностики и индикации позволяет:

- перед каждым пуском и во время работы ТПЧ проводить тестирование и контроль работы отдельных узлов ТПЧ;
- на ранней стадии выявлять неисправные резервированные элементы;
- индицировать на дисплее и передавать в САУ ЭГПА тип сработавшей защиты и номер отказавшего устройства;
- вести протокол зафиксированных неисправностей и отказов.

Встроенная система аварийного осциллографирования обеспечивает непрерывную запись в память контроллера основных сигналов и параметров силовой схемы с возможностью последующей передачи в ПК накопленных данных и вывода на дисплей требуемых осциллограмм до- и послеаварийных процессов.

СУРЗА включает устройство связи с объектом (УСО), центральный процессор (ЦП) и блок выходных цепей (БВЦ).

Рис. 8. Шкаф управления ТПЧ-6,3



В качестве ЦП использован процессор ADSP-2181 (рис.7) фирмы Analog Devices (командный цикл 25 нс). Возможна установка дополнительно сопроцессора типа ADSP-21160 "Sharc" с плавающей запятой (32 разряда) для расчета модели СД.

Основные параметры ЦП:

- ✓ число аналоговых входов – 32, две группы по 16 синхронных АЦП с быстродействием 8 мкс (AD7895);
- ✓ общее число перепрограммируемых цифровых линий ввода-вывода, организованных через ПЛИС XC3S0-PQ240 – 128;
- ✓ два последовательных канала передачи данных RS-232;
- ✓ один быстродействующий последовательный канал 1 МБод;
- ✓ клавиатура – матрица 4 × 4 + 8 клавиш;
- ✓ дисплей – жидко-кристаллический графический индикатор DG 24064-2;
- ✓ FLASH-память AM29F040-PLCC (512 Кбайт);
- ✓ встроенный цифровой осциллограф на 1Мбайт событий (два корпуса 514400).

Все задачи по обработке входной информации, реализации алгоритмов управления преобразователем, его регулированию и защите, задачи контроля и диагностики состояния оборудования, вывода любой информации на встроенный дисплей решаются на программном уровне.

Интерфейс ЦП с внешней средой осуществляется через программируемую логическую матрицу XC3S0-PQ240 (240 выводов), которая выполняет также функцию фазоимпульсного

преобразования, что позволяет выдавать импульсы управления с большой точностью без использования ресурсов процессора. Для работы с персональным компьютером и связи с САУ ЭГПА система имеет два последовательных интерфейса RS-232 (реализованных в логической матрице) и быстрый интерфейс сигнального процессора. Кроме того, для индикации параметров объекта и типов неисправностей, индикации и изменения параметров настройки самой системы управления имеется жидкокристаллический графический дисплей DG 24064-2 (240 × 64 пиксела) и клавиатура 4 × 4 = 16 кнопок + 8 функциональных кнопок меню дисплея.

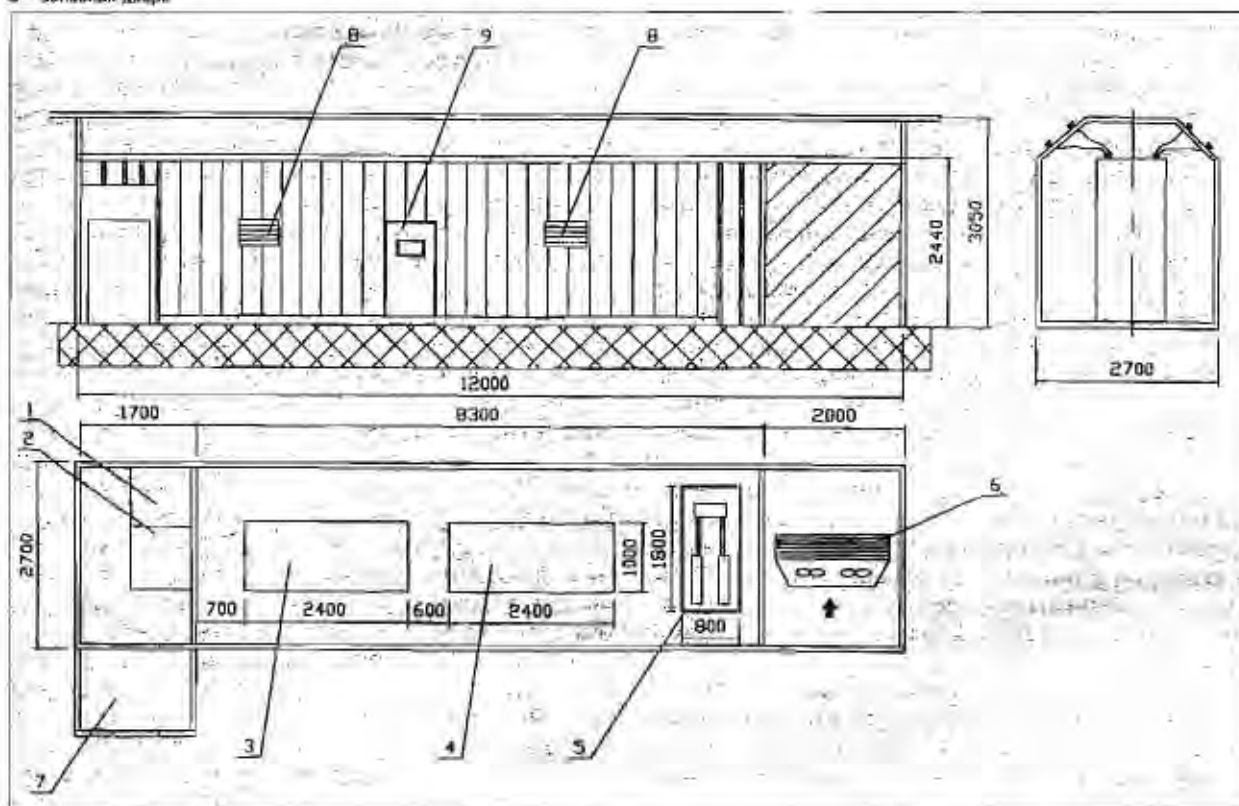
Система содержит большой объем сервисного программного обеспечения, организованного в виде иерархического меню, которое выводится на дисплей. Главные ветви меню включают:

- автоматический вывод информации о событиях, приводящих к изменению режима системы (срабатывание защит, действия оператора и т.п.);
- просмотр параметров объекта и системы управления;
- изменение параметров системы управления и защиты;
- аварийный осциллограф.

Конструктивно СУРЗА и два блока БСУ выполнены в виде трех кассет, размещенных в шкафу управления ШУ ТПЧ. Дублированный источник питания, входные и выходные оптронные преобразователи, усилители и клеммники располагаются на боковых стенках шкафа (рис.8). Обслужива-

Рис.9. Общий вид контейнера:

1 – шкаф управления ТПЧ; 2 – УПВ; 3 – ВТУ 1; 4 – ВТУ 2; 5 – система водяного охлаждения; 6 – теплообменник; 7 – тамбур; 8 – кондиционеры; 9 – запасная дверь.



ние шкафа – одностороннее, габаритные размеры – 1500 × 600 × 400 мм, масса – не более 150 кг.

Размещение оборудования ТПЧ

Преобразовательный трансформатор размещается на открытом воздухе, сглаживающий реактор – на открытом воздухе под навесом, высоковольтные тиристорные устройства, устройство питания возбуждателя двигателя, шкаф управления и система охлаждения – в контейнере с искусственным поддержанием температурного режима.

Габаритные размеры контейнера (рис. 9): 2700 × 12000 × 3050 мм, масса оборудования в контейнере – 10 т. ШУ и УПВ размещаются в отсеке управления, ВТУ1, ВТУ2 и СО – в вентильном отсеке. В этих отсеках поддерживается температура от +10 до + 27 °С. Теплообменник вода-воздух размещается в полуоткрытом неотапливаемом отсеке.

Размещение основного оборудования преобразователя в контейнере позволяет отказаться от строительства специального отапливаемого помещения.