

*Инж. М.А. Смирнитский, инж. К.Н. Седов, инж. Г.А. Липидус,
инж. В.Г. Гольцов, инж. Т.Ю. Карета, инж. А.Н. Казачков*

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ПНЧИ-3 ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА ВВЭР-440

Системы управления и защиты реакторов типа ВВЭР-440 используют органы регулирования (ОР) типа зубчатая рейка-шестерня. Шестерня приводится во вращение специальным низко-частотным низкооборотным электродвигателем. Каждый стержень реактора оснащен исполнительным механизмом ОР и соответственно двигателем. Используются электродвигатели типа РД42-4РВ.

Электродвигатель РД42-4РВ выполнен как трехфазный синхронный реактивный двигатель с двумя парами полюсов. Обмотки статора двигателя соединены в звезду без нейтрального вывода. Частота вращения двигателя определяется (задается) частотой напряжения питания, направление вращения двигателя определяется (задается) чередованием фаз напряжения питания.

Номинальная частота вращения двигателя составляет 33 об/мин, номинальная частота напряжения питания 1,1 Гц.

Питание двигателя осуществляется от специального преобразователя частоты типа ПНЧИ-3, разработанного специально для указанных целей.

Преобразователи частоты получают питание от системы надежного питания СУЗ (системы постоянного тока 220 В) и преобразуют постоянное напряжение питания в переменное трехфазное напряжение питания двигателя с частотами и уровнями, обеспечивающими формирование режимов, задаваемых СУЗ: движение, фиксация, падение и подхват стержня.

Преобразователь частоты ПНЧИ-3 по принципу функционирования выполнен по классической трехфазной мостовой схеме автономного инвертора напряжения с внешним звеном постоянного тока и полностью управляемыми ключевыми элементами.

В качестве ключевых элементов используются IGBT модули фирмы Semikron с полумостовой схемой в каждом модуле.

Указанное назначение преобразователя, принципы обеспечения требуемой надежности питания двигателя привода ОР (обеспе-

чение режима фиксации привода при любых единичных неисправностях элементов преобразователя) и свойства и конструкция используемых ключевых элементов определили построение структуры преобразователя.

Структурная схема преобразователя приведена на рис.1, где М – двигатель; БМ(А), БМ(В), БМ(С) – блок модулей фаз А,В,С; БУКР – блок управления и контроля рабочий; БУКД - блок управления и контроля диагностический; МТ – модуль JGBT транзисторный; ДР – драйвер управления МТ; Q – выключатель автоматический; ДТ – датчик тока; сигналы управления: Р – разрешение, К – контроль, В – вверх, Н – вниз.

Функционально-конструктивно преобразователь содержит 5 частей - блоков, из которых:

2 блока - функционально блоки управления и контроля (блок управления и контроля рабочий БУКР и блок управления и контроля диагностический БУКД);

3 блока - функционально силовые блоки содержат силовые модули (блок модулей БМ фазы А, блок модулей БМ фазы В, блок модулей БМ фазы С).

Блоки управления и контроля БУКР и БУКД воспринимают управляющие команды Р-разрешение, К-контроль, В-вверх, Н-вниз от системы управления верхнего уровня, определяют заданный режим и вырабатывают сигналы, управляющие блоками БМ, обеспечивающие формирование заданных токов двигателя и осуществляют необходимые диагностику, защиту и индикацию состояния преобразователей.

Заданные режимы работы двигателей реализуются в результате ШИМ модуляции напряжения питания преобразователя.

Блоки БУКР и БУКД содержат микропроцессорные контроллеры на базе специализированного моторного микропроцессора N80C196МН фирмы INTEL.

Блоки БУКР и БУКД имеют одинаковое конструктивное исполнение, но различаются функциональными назначениями и соответственно программным обеспечением.

Контроллер блока БУКР обеспечивает формирование режимов работы и величин токов фаз двигателя привода ОР в соответствии с заданными управляющими командами - рабочий режимный контроллер (РК).

Контроллер блока БУКД определяет соответствие реального режима работы и реальных величин токов фаз двигателя, сформи-

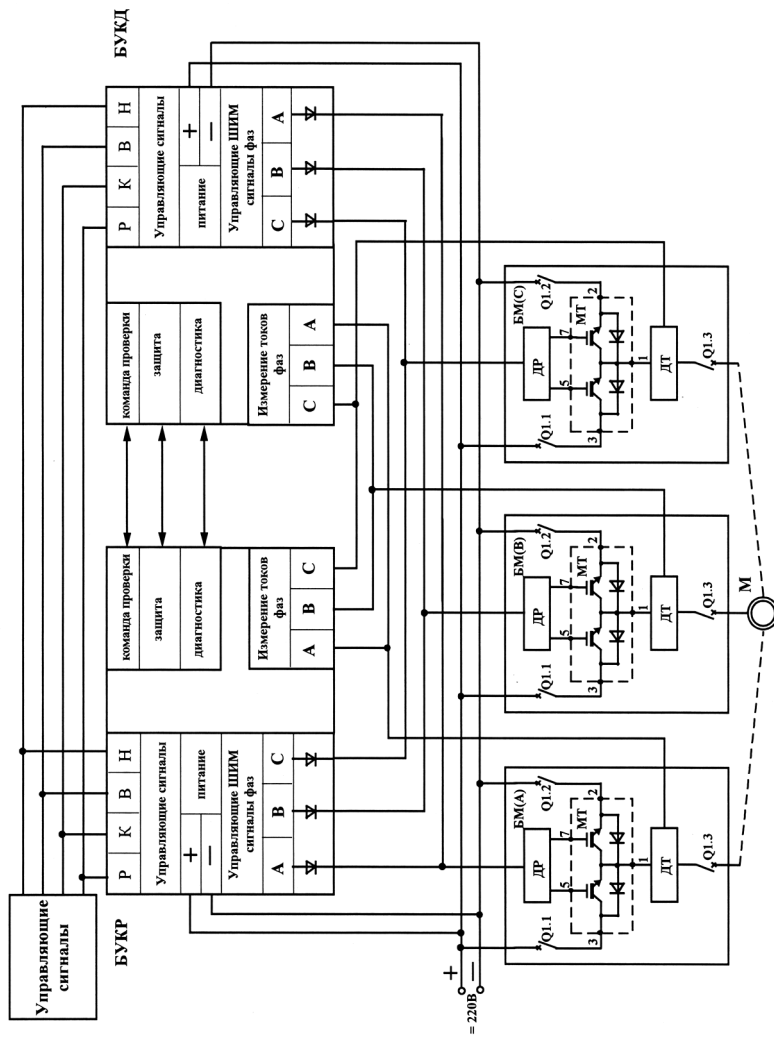


Рис. 1. Структурная схема преобразователя

рованных РК, заданными управляющими сигналами - диагностический (защитный) контроллер (ДК).

При несоответствии режима работы и значений токов фаз двигателя, сформированных РК, управляющим сигналам, воспринимаемым ДК, диагностический контроллер отключает (блокирует) блок БУКР и формирует режим стоянки двигателя под током (режим фиксации).

Диагностический контроллер (блок БУКД) оснащается программным обеспечением, реализующим только режим стоянки двигателя под током. Режимы движения диагностическим контроллером не реализуются.

Блоки модулей (БМ) содержат ключевые силовые элементы - модуль IGBT транзисторный (МТ), коммутационную и защитную аппаратуру - выключатель автоматический (Q), устройства управления (ДР) и датчик тока (ДТ), обеспечивающий измерение тока фазы двигателя.

При возникновении неисправности в одной из фаз преобразователя (в одном из блоков БМ) она автоматически отключается действием автоматических устройств (автоматического выключателя или устройств защиты), входящих в состав блока, а преобразователь (две оставшиеся фазы) автоматически переводится в режим фиксации положения ОР (стоянка двигателя под током).

Неисправный блок выдвигается из каркаса преобразователя и вместо него, без нарушения режима фиксации положения ОР, устанавливается исправный блок. Вновь установленный блок включается в трехфазный режим работы преобразователя.

Таким образом обеспечивается необходимое режимное резервирование блоков БМ, обеспечивающее надежное питание двигателя привода регулирующего органа.

Для поддержания заданных значений тока статора двигателя привода ОР контроллеры содержат автоматические регуляторы тока, уставки которых изменяются автоматически в соответствии с режимами, задаваемыми управляющими сигналами.

Определение и формирование режимов работы двигателя осуществляются с использованием отображающего вектора токов статора двигателя, параметры которого рассчитываются контроллерами БУКР и БУКД в каждом цикле реализации программы.

Автоматические регуляторы тока, используя измеренные значения токов фаз двигателя и заданные значения уставок по току, вырабатывают регулирующие воздействия и соответствующим образом воздействуют на системы формирования ШИМ-сигналов и из-

меняют этим напряжения питания двигателя, формируемые преобразователем. В итоге, устанавливаются токи в фазах статора двигателя со значениями, соответствующими заданным управляющими сигналами.

Диагностический контроллер определяет исправность работы рабочего контроллера по соответствию реализуемых режимов заданным и имеет приоритет в оценке работоспособности блока БУКР.

Для диагностирования блока БУКД предусмотрены непрерывный частичный контроль и периодический полный контроль блоком БУКР работоспособности диагностического контроллера.

В блоках БУКР и БУКД предусмотрены переключатели режимов. Переключатели имеют два положения «тест» и «работа». В положении «тест» блокируются выходные ключи блока при полностью работающем микроконтроллере, что позволяет произвести проверку микроконтроллеров при вводе в работу блока (БУКР или БУКД) при работающем преобразователе.

Таким образом обеспечивается непрерывность управления блоками БМ и надежность питания двигателей ОР.

Функционирование преобразователя обеспечивается действием контроллеров БУКР и БУКД.

Структура программного обеспечения контроллеров БУКР и БУКД приведена на рис. 2.

В блоке АЦП осуществляется 10-битное восьмиканальное аналого-цифровое преобразование значений токов статора двигателя и аналоговой части уставок.

В блоке α - β преобразования определяются α - β составляющие и модуль отображающего вектора токов статора в соответствии с выражениями:

$$I_{\alpha} = 1/3 (2i_a - i_b - i_c); \quad I_{\beta} = 1/\sqrt{3} (i_b - i_c); \quad I_{от} = \sqrt{I_{\alpha}^2 + I_{\beta}^2},$$

где: i_a, i_b, i_c - мгновенные значения токов фаз статора; I_{α}, I_{β} - α и β -составляющие отображающего вектора токов статора; $I_{от}$ - модуль отображающего вектора токов статора.

Определенный модуль и фаза (по α и β -составляющим) отображающего вектора используются для осуществления автоматического регулирования тока (блок ПИ регулятора) и защиты по значению и изменению фазы токов.

Использование для регулирования и защиты отображающего вектора токов обеспечивает возможность четкого и строгого определения значений токов при изменении частоты напряжения питания в неограниченных пределах.

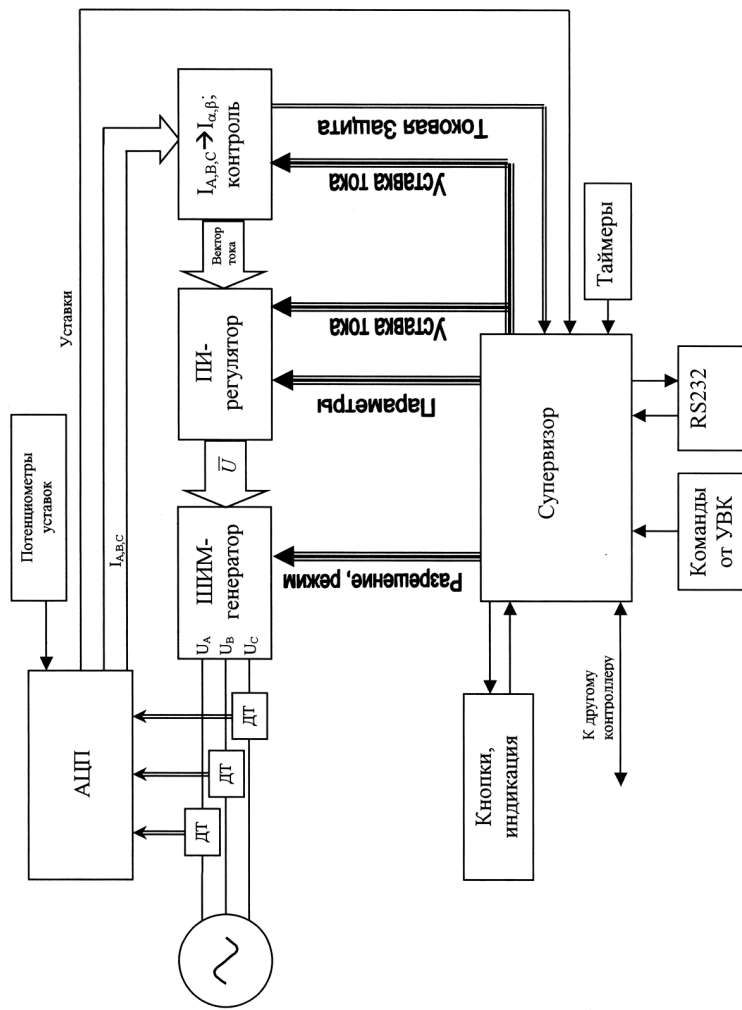


Рис. 2. Структура программного обеспечения контроллеров БУКР и БУКД

В блоке ПИ регулятора реализуется дискретный пропорционально-интегральный регулятор с ограничением по выходу.

Регулирующее воздействие определяется по выражениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{вых}}^{\text{пр}}(k) = U_{\text{вых}}^{\text{пр}}(k-1) + K_0 \Delta I^{\text{пр}}(k) - K_1 \Delta I^{\text{пр}}(k-1); \\ 0 \leq U_{\text{вых}}^{\text{пр}}(k) \leq 2U_{\text{вых}}^{\text{пр}}, \end{array} \right.$$

где: пр - программные значения, учитывающие формат переменных; ΔI - отклонение отображающего вектора тока от уставки; $U_{\text{вых}}$ - значение напряжения на выходе регулятора; $U_{\text{вых}}^{\text{пр}}$ - номинальное программное значение напряжения на выходе преобразователя.

Коэффициенты регулятора с учетом форматов данных корректируются в пределах $\pm 16\%$ и находятся в диапазоне : $K_0=87,308...530,618$; $K_1=87,273...523,636$.

Постоянная времени регулятора T_0 принимается равной 2 мс.

В блоке ШИМ генератора вырабатываются ШИМ сигналы, обеспечивающие формирование, в зависимости от назначенного режима, трехфазного переменного тока частотой 1,1 Гц (режим движения) или постоянного тока по двум фазам двигателя (режим фиксации).

Преобразование управляющих сигналов в ШИМ сигналы производится с использованием предрасчетной таблицы функции SIN и определением фазового положения ротора в расчетных единицах (4800 состояний ротора на оборот).

В блоке «Супервизор» реализуются все алгоритмы управления и защит, дешифровка и выполнение управляющих команд, взаимодействие между контроллерами и формируется индикация действия контроллеров и блоков.

Сравнительно высокое сопротивление обмотки статора двигателя (3,8 Ом на фазу при 20 °С) позволяет производить с допустимыми погрешностями определение средней температуры обмотки двигателя в режиме фиксации, когда две фазы обмотки питаются постоянным (выпрямленным) напряжением.

В преобразователе предусмотрена соответствующая программная система.

Система рассчитывает сопротивление обмотки статора каждый раз, когда преобразователь переходит в режим фиксации и, используя метод сопротивления, определяет температуру обмотки статора

и вырабатывает сигнал о критическом перегреве двигателя. Реальная погрешность системы вызвана различными длинами соединительных линий, разбросом параметров двигателей, погрешностью АЦП, колебаниями питающего напряжения, и составляет не более 10%.

При действии предусмотренных защит управление блоками БМ переключается с блока БУКР на блок БУКД, который реализует только режим фиксации.

Для возвращения управления на блок БУКР эксплуатационный персонал должен производить ручную операцию «квитирование» нажатием на соответствующие кнопки, расположенные на блоках БУКР и БУКД.

Действие защит может быть вызвано (и реально вызывается) не только установившимися отказами элементов, но и кратковременными, вызванными кратковременными изменениями параметров дискретных элементов, помехами по цепям питания и другими аналогичными причинами.

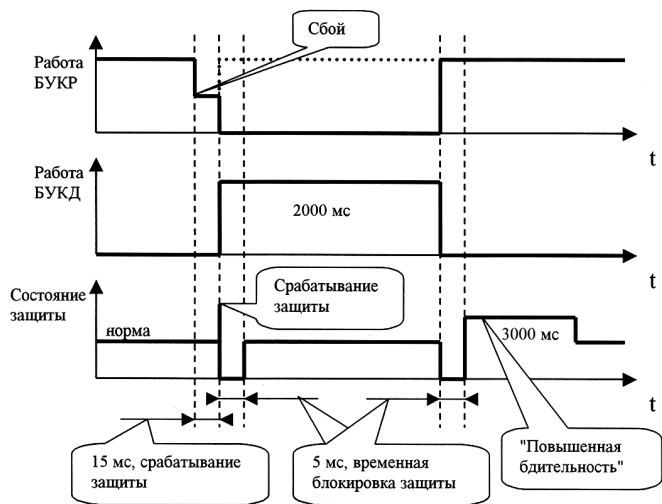
Для увеличения качества эксплуатации в преобразователе предусмотрена система - автоматическое повторное квитирование (АПВ), обеспечивающая автоматическое восстановление полной управляемости после кратковременных проходящих сбоев в работе. На рис. 3 показана последовательность действия системы АПВ при успешном квитировании (кратковременном отказе) и при неуспешном АПВ, когда возник отказ более длительный, чем время, предоставляемое системой АПВ, для восстановления работоспособности отказавшего элемента.

При действии защиты и, затем АПВ, стержни реактора не падают, а фиксируются в положении, в котором они находились при возникновении неисправности.

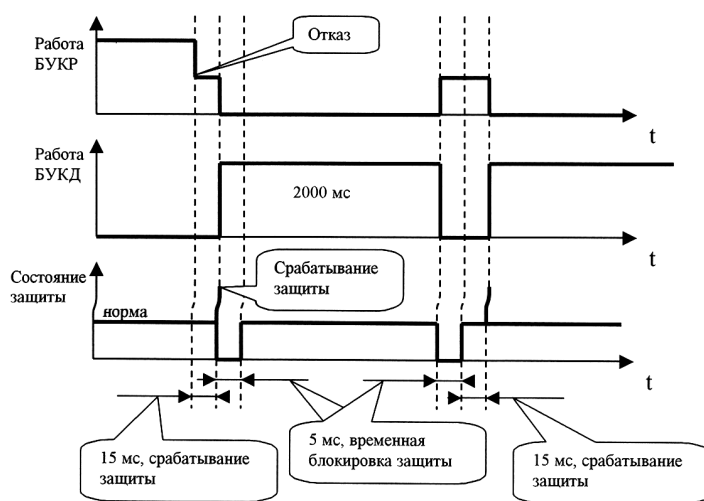
Для проведения настройки и эксплуатационных проверок преобразователя частоты предусмотрена специализированная информационно-измерительная система (СИИС).

Подключив к преобразователю через последовательный канал с протоколом RS232 (разъемы для которого установлены на лицевых панелях блоков БУКР и БУКД) любой персональный компьютер, в котором установлены операционная система MS-DOS и специальное программное обеспечение СИИС, можно получить по запросу:

– измеренные значения токов на выходе преобразователя в режимах движения, фиксации и форсировки;



a



b

Рис. 3. Последовательность действия системы АПВ:
a – успешное при кратковременном сбое; *b* – неуспешное при отказе БУКР

- установленные значения уставок автоматического регулятора АРТ по токам движения, фиксации и форсировки;
- измеренное значение частоты модулирующего напряжения;
- результаты тестирования контроллера;
- результаты определения полной контрольной суммы программы, записанной в постоянное запоминающее устройство;
- текущее значение управляющих сигналов.

Программные средства СИИС состоят из двух частей.

Одна часть - специальное программное обеспечение (СПО) устанавливается в компьютер, используемый для СИИС.

Вторая часть записывается непосредственно в программные изделия (ППЗУ), устанавливаемые в блоки БУКР и БУКД.

Указанная информация, предоставляемая СИИС, отображается на дисплее используемого персонального компьютера в формате, приведенном на рис.4.

[R] ТЕСТ КОНТРОЛЛЕРА ПРИ НАЖАТИИ КНОПКИ (R) НА БЛОКЕ	
Тест регистрового ОЗУ	:
Тест WSR и регистровой памяти с оконной системой	:
Тест команд арифметических действий	:
Тест команд логических действий	:
Тест команд условных переходов	:
Тест команд работы со стекком	:
Контрольная сумма ПЗУ	:
[T] ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТ, Гц	
Частота в фазе:	
[V] ЗАПИСЬ УСТАВОК, А--[T] ЧТЕНИЕ УСТАВОК, А	
Ток фиксации	:
Ток движения	:
Ток форсировки	:
[Z] ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ФОРСИРОВКИ---[S] ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКОВ ФАЗ, А	
Действ. знач. тока фикс.	: [P]:[]
Действ. знач. тока движ.	: [B]:[]
Ток форсировки	: [H]:[]
Отображающий вектор	: [K]:[]
[F] РАЗРЕШЕНИЕ ЗАПРЕТ Δ/ΠХ	
Формирование сигналов Δ/ΠХ [*]	

Рис. 4. Информация, предоставляемая СИИС

Блоки БУКР и БУКД, оснащенные указанными программными средствами, содержат программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий:

- автоматическое поддержание задаваемых значений токов на выходе преобразователя;
- диагностирование и защиту при нарушении задаваемых режимов работы преобразователя;
- работоспособность преобразователя при неисправности (отключении) блоков БМ или БУК;
- автоматическое повторное квитирование при кратковременных сбоях в преобразователе;
- обнаружение критического перегрева двигателя в процессе регулирования;
- возможность проведения проверок и настроек преобразователя при использовании персонального компьютера СИИС;
- блокирование (отключение) блока БУКР и формирование режима фиксации (передачу управления) блоком при отклонении значений формируемых токов от значений, задаваемых уставками АРТ, более чем на $\pm 15\%$, в течение времени более 35 мс (защита по току), при отклонении симметрии измерений формируемых токов более чем на 25%, минимального значения тока фиксации в течение времени до 100 мс и несоответствии в течение времени до 2 с формируемого режима работы преобразователя режиму задаваемому управляющими сигналами, поступающими на управляющие входы блока БУКД (защита по режиму, включая режим возникновения несанкционированного движения привода вверх);
- переход в режим фиксации по блокам, остающимся в работе при отключении блока БМ или блока БУКР в режиме движения;
- переход формирования режима фиксации на блоки, остающиеся в работе при отключении блока БМ или блока БУКР в режиме фиксации.

Значения уставок тока срабатывания, времени действия защит и допустимой асимметрии измерений формируемых токов устанавливаются программным путем на основании задаваемых параметров двигателя привода ОР СУЗ.

Основные формируемые режимы работы двигателя привода ОР СУЗ приведены в таблице.

Конструктивно преобразователь состоит из несущей конструкции (каркаса) и пяти выдвижных блоков:

- три блока модулей (блоки БМ);
- один блок управления и контроля рабочий (блок БУКР);

Режим работы двигателя	Действующее значение тока фазы	Частота и величина напряжения питания	Чередование фаз	Условный угол положения ротора или отображающего вектора токов
Нет вращения двигателя в условно прямом направлении			Обратное или отсутствует	Постоянный или изменяется в направлении от 360 к 0 град
Вращение двигателя в условно прямом направлении (движение ОР вверх)	11 — 14 А по каждой из трех фаз (трехфазный симметричный режим)	1,1 Гц синусоидальное напряжение, обеспечивающее указанный ток	Прямое	Изменяется в направлении от 0 к 360 град
Стоянка двигателя под током (фиксация положения ОР)	10 — 12 А по каждой из двух фаз (двухфазный режим)	Постоянное напряжение, обеспечивающее указанный ток	Постоянный ток	Неизменный
Вращение двигателя в условно обратном направлении (движение ОР вниз)	11 — 14 А по каждой из трех фаз (трехфазный симметричный режим)	1,1 Гц синусоидальное напряжение, обеспечивающее указанный ток	Обратное	Изменяется в направлении от 360 к 0 град
Нет токов в фазах двигателя (ОР в нижнем положении)	0	0	—	Неизменный
Форсирование токов в фазах двигателя (подхват ОР)	14 — 17 А по каждой из двух фаз (двухфазный режим) в течении 1 с после коммутации команд	Постоянное напряжение, обеспечивающее указанный ток	Постоянный ток	Неизменный

– один блок управления и контроля диагностический (блок БУКД).

Каждый из пяти блоков устанавливается в каркас преобразователя по направляющим.

Лицевая сторона преобразователя образована пятью лицевыми панелями блоков. На лицевых панелях блоков расположены органы управления и индикации, и нанесено их обозначение.

На задней стороне преобразователя расположен жгут с электрическими соединителями для подключения.

Преобразователь выполнен с естественным воздушным охлаждением, изготовлен из трудногорючих материалов и имеет двухстороннее обслуживание. Габаритные размеры 238×480×423 мм, масса преобразователя 25 кг. Преобразователь устанавливается в панель ППД, которая имеет для его установки направляющие. Преобразователь вдвигается по направляющим в панель до упора и крепится к ней спереди и сзади винтами.

На рис.5 приведена фотография преобразователя частоты ПНЧИ-3.

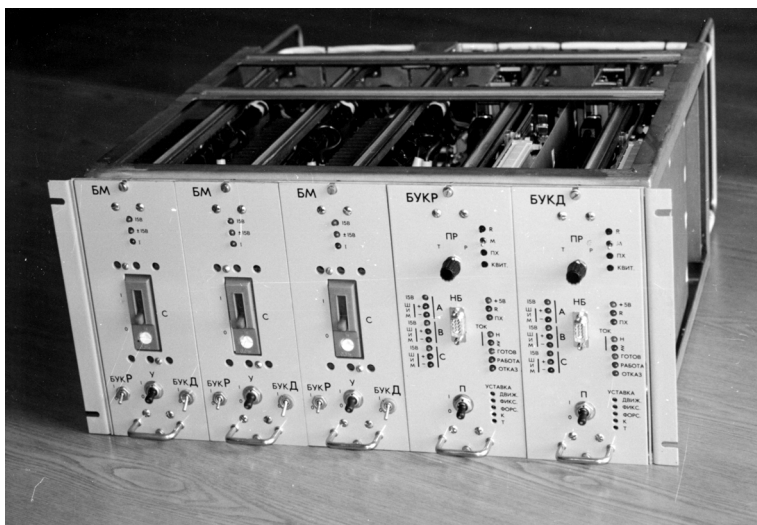


Рис. 5. Преобразователь низкой частоты ПНЧИ-3

Использованные структура преобразователя, структура программного обеспечения, предусмотренные защиты и средства резервирования и исполнения обеспечивают:

- среднее время непрерывной работы преобразователя без отключения для подстройки параметров не менее 10^4 ч;
- среднюю наработку на неисправность преобразователя не менее $4 \cdot 10^4$ ч;
- среднюю наработку на отказ преобразователя не менее $40 \cdot 10^4$ ч.

Показатели надежности подтверждены опытом промышленной эксплуатации 74 преобразователей на первом и втором блоках АЭС «Моховце».

Конструкция микропроцессорного контроллера разработана под руководством С.Я.Куцакова.

Программное обеспечение ПНЧИ-3 разработано совместно с кафедрой автоматизированного электропривода МЭИ.