

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭКСКАВАТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Остриров В.Н., Козаченко В.Ф., Русаков А.М.

До настоящего времени в регулируемых приводах основных механизмов экскаваторов и буровых станков находили применение только коллекторные двигатели постоянного тока и асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Традиционно применяемая на экскаваторах система Г-Д в течение последних 15 лет активно заменяется системой Тиристорный преобразователь-Двигатель постоянного тока (ТП-Д), а также системой Преобразователь частоты с непосредственной связью – Асинхронный двигатель (НПЧ-АД). Для обеих систем электропривода до сих пор не найдено удовлетворительное решение проблемы повышенного потребления реактивной мощности и значительных искажений напряжения питающей сети. Кроме того, для системы ТП-Д все еще остается актуальной проблема защиты от опрокидывания инвертора.

По этой и другим причинам, связанным прежде всего с появлением новой силовой преобразовательной техники и техники управления, все более перспективным оказывается применение в экскаваторном электроприводе систем, построенных на полностью управляемых силовых приборах с прямым цифровым управлением, как, например, в серийных преобразователях частоты “Универсал”. В таких системах решаются проблемы получения высокого коэффициента полезного действия привода, высокого коэффициента мощности, рекуперации энергии торможения в сеть. Одним из активно разрабатываемых и внедряемых сегодня решений является привод по схеме Активный выпрямитель – Инвертор напряжения– Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Главным недостатком такого привода является его сложность: система управления строится как векторная с ориентацией по потокосцеплению ротора. Значительные проблемы возникают с обеспечением требуемых динамических свойств привода в зоне ослабления поля.

Теоретически и технически переход к системе экскаваторного электропривода с асинхронными двигателями подготовлен и мог бы стать достижением. Мы считаем, однако, что это не будет прорывом вперед к более высокому качеству: это лишь промежуточное решение на пути создания более перспективного вентильно-индукторного привода.

В последнее десятилетие в мире резко активизировались работы по созданию силового электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей (ВИД). Эти двигатели несмотря на разнообразие конструкций и разное число фаз можно разделить на три большие группы: с самовозбуждением; с независимым электромагнитным возбуждением; с магнитоэлектрическим возбуждением. Вентильно-индукторный привод (ВИП) с двигателями первой группы активно разрабатывается с ориентацией на массовые промышленные применения (прежде всего из-за простоты инвертора), а ВИП последней группы – с ориентацией на прецизионные станочные и робототехнические применения, где стоимость двигателя не является определяющей. Авторы уверены, что для построения современных экскаваторных приводов наиболее перспективны ВИД второй группы с независимой обмоткой возбуждения. Эта уверенность базируется на следующих обстоятельствах:

- Двигатель такого типа можно спроектировать с классической трехфазной обмоткой статора, рассчитанной на разно-полярное питание от обычного мостового инвертора напряжения, применяемого во всех современных преобразователях частоты, что значительно упрощает и удешевляет преобразователь;
- При большем числе фаз 6,9,12 и т.д. двигатель можно рассматривать как состоящий из нескольких независимых друг от друга трехфазных секций с управлением каждой секцией от отдельного мостового инвертора. Переход к многофазным двигателям обеспечивает простоту наращивания мощности привода при сохранении типовой структуры управления секциями;

- Питание контура возбуждения не является проблемой и может обеспечиваться со звена постоянного тока преобразователя через дополнительный силовой ключ, управляемый в режиме ШИМ от того же микропроцессорного контроллера привода;
- Наличие контура возбуждения обеспечивает: высокую кратность пусковых и стопорных моментов (не менее 2-3); расширенный диапазон (до 4:1) работы в зоне ослабления поля с поддержанием постоянства мощности; гибкость за счет программной реализации любого из требуемых режимов работы двигателя: независимого возбуждения, последовательного возбуждения;
- Возможность построения системы управления ВИП как системы управления вентильным двигателем (бесколлекторным двигателем постоянного тока) или как классической системы векторного управления, работающей в координатах  $d, q$ , жестко связанных с ротором. Эта система существенно проще системы векторного управления АД, т.к. отсутствует наблюдатель текущего положения потокосцепления ротора.

На рис. 1 в качестве примера показан разрез вентильно-индукторного двигателя мощностью 7,5 кВт с номинальной скоростью 1500 об/мин, изготовленного АЭК «Динамо» по проекту Русакова А.М. в качестве прототипа исполнительных двигателей для тяжелых условий эксплуатации. Двигатель имеет двухпакетный зубчатый ротор 1 и двухпакетный зубчатый статор 2, набранные из шихтованной электротехнической стали. Ротор безобмоточный, пассивный. Сосредоточенные катушки обмотки статора охватывают сразу оба пакета и включены по схеме симметричной трехфазной звезды. Между двумя пакетами статорами расположена кольцевая катушка обмотки возбуждения 3. Поток машины замыкается по корпусу статора 5 и втулке ротора 6, насаженной на вал 7. При повороте ротора на 360 эл. град. (одно полюсное деление) общее магнитное сопротивление машины остается неизменным, что является главным признаком двигателей этого типа. Машина имеет встроенный датчик положения ротора 8, реализованный на элементах Холла. Электрическое положение ротора определяется с точностью до 60 эл. град. Возможна установка более точных импульсных датчиков положения для поддержки систем векторного управления.

Поток возбуждения при вращении ротора модулируется его зубчатой структурой и с якорной обмотки можно снять обычную трехфазную систему синусоидальных напряжений - машина может работать в качестве индукторного генератора. Напротив, при питании обмотки статора от инвертора напряжения машина переходит в двигательный режим. Допускается как разнополярная шеститактная коммутация по датчику положения ротора (режим вентильного двигателя), так и синусно-косинусное управление напряжениями или токами статора в системах векторного управления. В обоих случаях используется такой же мостовой инвертор напряжения, как и в частотно-регулируемых асинхронных приводах.

Ротор машины жесткий, прочный и допускает во много раз большие ускорения, чем двигатель постоянного тока (ДПТ) или асинхронный двигатель (АД), что крайне важно при стопорениях «копающих» механизмов. Ротор ВИД в отличие от якоря ДПТ или ротора АД практически не греется, поскольку не имеет обмотки и вращается синхронно с полем статора. Тепло выделяется на статоре и его легче отводить (не надо продувать машину, как ДПТ или АД). В облегченном тепловом режиме работают и подшипники.

Двигатель может длительно работать в состоянии стопорения, в режиме электромагнитного тормоза, на низких скоростях при больших моментах, что очень важно для «копающих» механизмов. При установке соответствующих подшипников и балансировке ротора он допускает многократное ослабление поля, что важно для режимов опускания ковша экскаватора или опускания бурового става бурового станка.

Для вентильно-индукторных приводов необходим датчик положения ротора, однако принципиально возможно создание систем бездатчикового управления, базирующихся на измерении ЭДС статорных обмоток и цифровом выделении сигнала текущего электрического положения ротора.

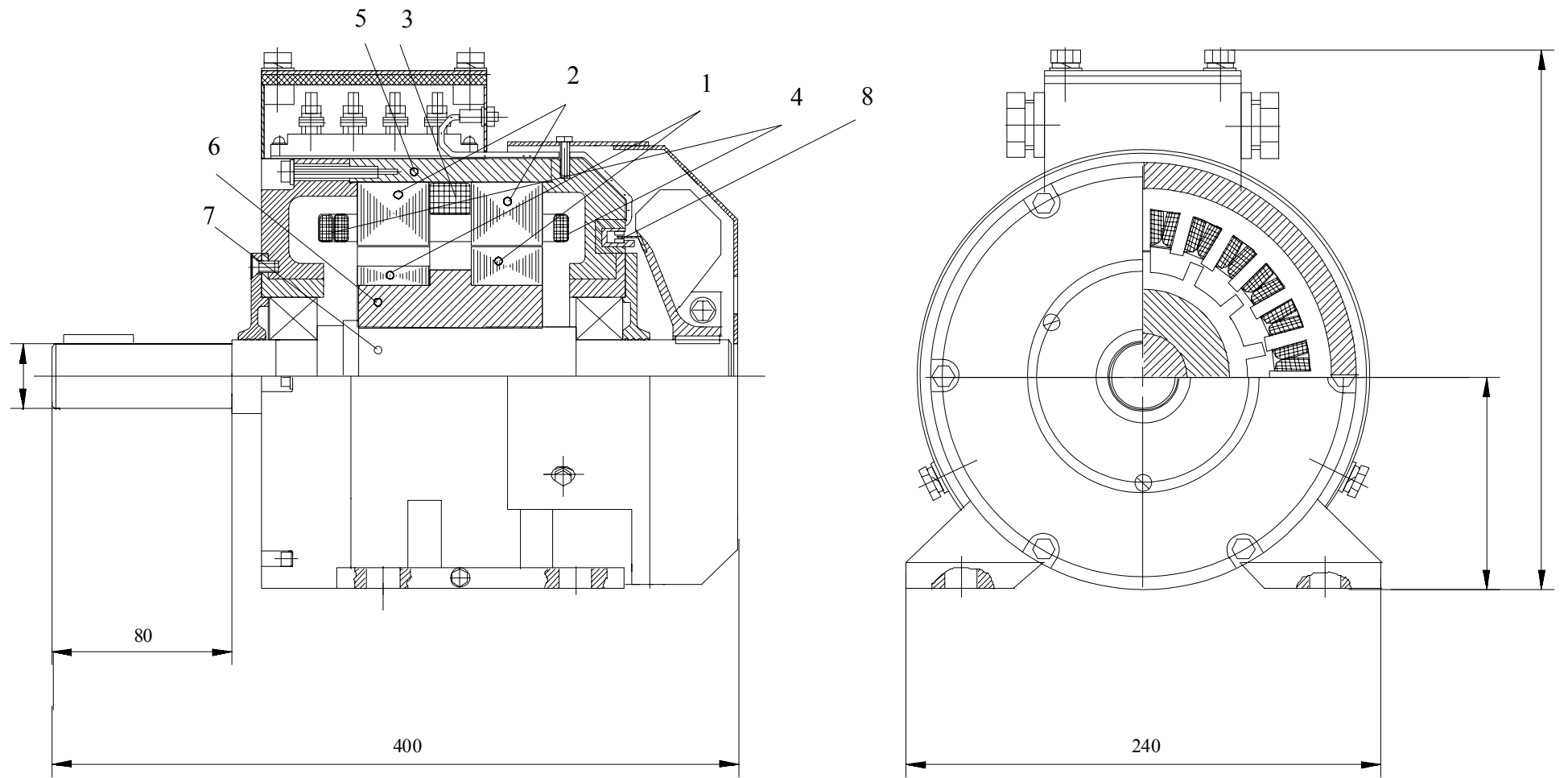


Рис. 1. Конструкция вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением.

Методы выделения сигнала положения, разработанные применительно к синхронным двигателям с активным ротором, оказываются эффективными и работоспособными для вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением.

Наиболее перспективна и реалистична структура экскаваторного электропривода, реализованная на уже отработанных в серийных преобразователях частоты «Универсал» и функционально законченных силовых и управляющих модулях – рис. 2.

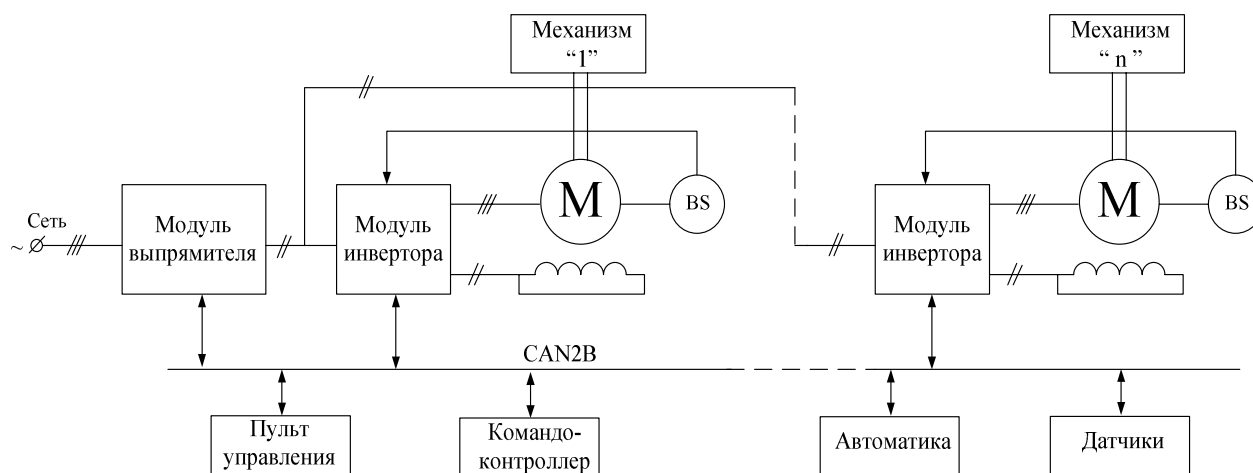


Рис. 2. Структура многоосевого экскаваторного электропривода на базе вентильно-индукторных двигателей с независимым возбуждением.

В составе силовой части имеется модуль выпрямителя. Для рассматриваемых машин предпочтительно иметь один выпрямитель на все электроприводы, что позволяет обеспечить частично прямой обмен энергией между механизмами, уменьшив рекуперацию в сеть и увеличив КПД системы в целом. Для каждого двигателя устанавливается модуль трехфазного инвертора (возможно несколько модулей инверторов при дроблении мощности по секциям статора двигателя). Модуль инвертора имеет в своем составе дополнительный ключ для управления контуром возбуждения двигателя.

Каждый инвертор имеет высокопроизводительный встроенный контроллер привода, обеспечивающий прием сигналов с датчика положения и прямое цифровое управление силовыми ключами. Все контроллеры приводов объединены надежной локальной промышленной сетью CAN, к которой подключены также дополнительные «интеллектуальные» модули со встроенным CAN-интерфейсом:

- модуль пульта оперативного управления с дисплеем и клавиатурой для управления процессом тестирования, настройки приводов и отображения текущего состояния и значений наблюдаемых переменных;
- модуль командоконтроллера для приема и обработки сигналов от командоконтроллера машиниста;
- модули дискретного и аналогового ввода/вывода для сопряжения с дополнительными датчиками и технологической автоматикой;
- модули сопряжения с системами верхнего уровня для решения задач диспетчеризации, в том числе с радиомодемами для сопряжения с удаленными компьютерами.

Модуль инвертора типовой и состоит из трех «стоек» силовых ключей на IGBT-транзисторах с обратными диодами, собранными в «интеллектуальный» модуль или не-

сколько модулей (Intelligent Power Module - IPM). Для питания обмотки возбуждения двигателя используется седьмой ключ с встречно включенным диодом.

Для оценки возможности применения вентильно-индукторного двигателя на мощном приводе подъема экскаватора ЭКГ-5А, где в настоящее время используется привод по системе Г-Д с коллекторным двигателем постоянного тока типа ДЭ-816 (мощность - 200кВт; ПВ-100%; напряжение - 440В; ток якоря - 490А; частота вращения - 750об/мин; КПД - 93%; двойная перегрузка по моменту; двойное увеличение скорости при постоянстве мощности), был спроектирован ВИД с параметрами, не уступающими прототипу.

Расчеты выполнены в программной среде, разработанной Русаковым А.М., адекватность которой подтверждена проектированием и последующим промышленным освоением более десятка типов аналогичных машин различной мощности с высотой оси от 80 до 400 мм. [1].

ВИД при сохранении высоты оси и присоединительных размеров двигателя ДЭ-816 имеет следующие номинальные параметры: мощность - 190кВт (ПВ100%); напряжение - 560В; действующий ток фазы статора - 155А; частота вращения - 740об/мин; КПД - 96%; допускается двойная перегрузка по моменту и многократное увеличение скорости при постоянстве мощности. Кроме этого, ВИД по сравнению с двигателем постоянного тока допускает длительную работу с номинальным моментом в заторможенном состоянии, многократно большие ускорения, не имеет щеточно-коллекторного узла (машина бесконтактная), не выделяет тепла в роторе, практически не требует обслуживания, значительно проще в ремонте и на 30% легче двигателя ДЭ-816.

Основные параметры ВИД в сравнении с некоторыми параметрами двигателя прототипа приведены в табл.1.

Таблица 1.

Геометрические, обмоточные и расчетные данные ВИД и ДЭ-816

	ВИД	ДЭ-816
Число фаз.....	9	
Число трехфазных групп.....	3	
Число пакетов статора.....	4	
Число зубцов ротора.....	11	
Число зубцов статора.....	18	
Наружный диаметр корпуса.....мм	800.000	
Длина корпуса.....мм	760.000	
Масса двигателя.....кг	2096.000	
Масса активных материалов машины.....кг	1356.000	
Масса меди.....кг	146.000	450.000
в том числе:		
Масса меди обмотки якоря.....кг	102.000	90.000
Масса меди обмотки возбуждения.....кг	44.000	360.000
Масса стали.....кг	1950.000	
в том числе:		
Масса магнитомягкой стали СТ3.....кг	1030.000	
Масса электротехнической стали 2212..кг	470.000	
Масса немагнитной стали 12Х18Н10Т...кг	150.000	
Масса подшипниковых щитов.....кг	300.000	
Момент инерции ротора.....кг*м*м	8.680	
Сопrotивление проводов обмотки якоря.....МОМ	9.105	11.400
Сопrotивление провода обмотки возбуждения...Ом	2.421	2.920

Одноименные фазы каждой из трех трехфазных групп, работающих от отдельного инвертора, сдвинуты на 30 эл.град.

На рис. 3. представлена структура системы управления трехсекционным вентильно-индукторным двигателем.

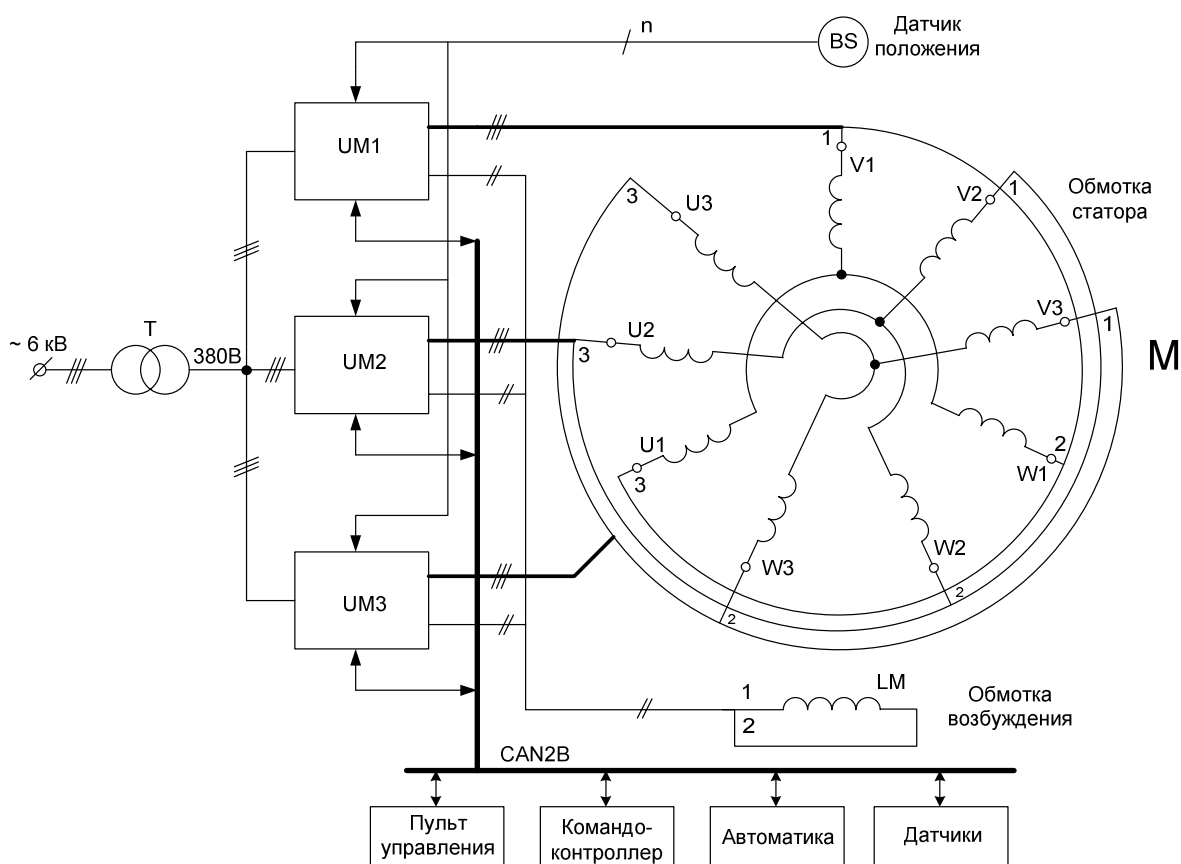


Рис.3. Функциональная схема электропривода подъема экскаватора на базе ВИД.

Силовая часть привода состоит из двигателя М, трех преобразователей UM1-UM3 и согласующего трансформатора Т. ВИД девятифазный, обмотка статора разбита на три трехфазные группы. Имеется одна общая обмотка возбуждения LM и общий датчик положения ротора BS.

Каждый из трех преобразователей подключен по силовому входу к сети через согласующий понижающий трансформатор, по силовому выходу к своей трехфазной группе обмоток статора. Все три преобразователя имеют выход для питания обмотки возбуждения двигателя и подключены к ней параллельно. По информационным входам каждый из трех преобразователей подключен к своей группе выходов импульсного датчика положения ротора. Все контроллеры преобразователей объединены между собой локальной промышленной сетью CAN, к которой подключаются и дополнительные интеллектуальные модули, обеспечивающие сопряжение с датчиками и управляющими устройствами.

Преобразователи UM1-UM3 одинаковые, каждый состоит из двух модулей - модуля активного фильтра (выпрямителя) на входе и модуля инвертора на выходе. Они имеют практически идентичные схемы трехфазных мостовых преобразователей на полностью управляемых ключах, связанных между собой по звену постоянного тока, имеют одинаковую силовую элементную базу, одинаковые модули контроллеров привода, ввода-вывода, питания, практически одинаковую конструкцию. Каждый преобразователь размещается в шкафу размером 800x800x1800мм.

Данная система электропривода обладает рядом преимуществ:

Во-первых, при использовании активного фильтра обеспечивается двунаправленный обмен энергией с электрической сетью при поддержании во всех режимах работы

двигателя коэффициента мощности, близкого к единице. КПД системы электропривода в целом составляет около 92%.

Во-вторых, благодаря отсутствию жестких ограничений на максимальную частоту вращения двигателей, ускорения, производные тока, продолжительность работы в заторможенном состоянии, система обеспечивает формирование статических и динамических характеристик с учетом только технологических требований и ограничений по механике.

В третьих, дробление мощности и, соответственно, дробление обмотки статора на группы при питании каждой из них от несвязанных по силовой части преобразователей создает условия «горячего» резервирования на случай отказов в преобразователях и возможность продолжения работы с потерей части мощности. По обмотке возбуждения может обеспечиваться трехкратное резервирование. Структура силовых преобразователей такова, что пропадание напряжения сети не является аварийным режимом, привод будет управляемым вплоть до его остановки и наложения тормоза

В четвертых, прямое цифровое управление всеми силовыми ключами преобразователей от высокопроизводительных контроллеров с двумя менеджерами событий и общим количеством одновременно управляемых силовых ключей до 16, программной идентификацией электрического положения и скорости привода дает возможность создавать самые совершенные структуры управления, вплоть до систем векторного управления и прямого цифрового управления моментом. На рис. 4 показан общий вид специализированного контроллера привода МК13.1, имеющего производительность 150 млн.оп./с и все виды интерфейсов для прямого цифрового управления как оборудованием преобразователя, так и для сопряжения с другими системами.

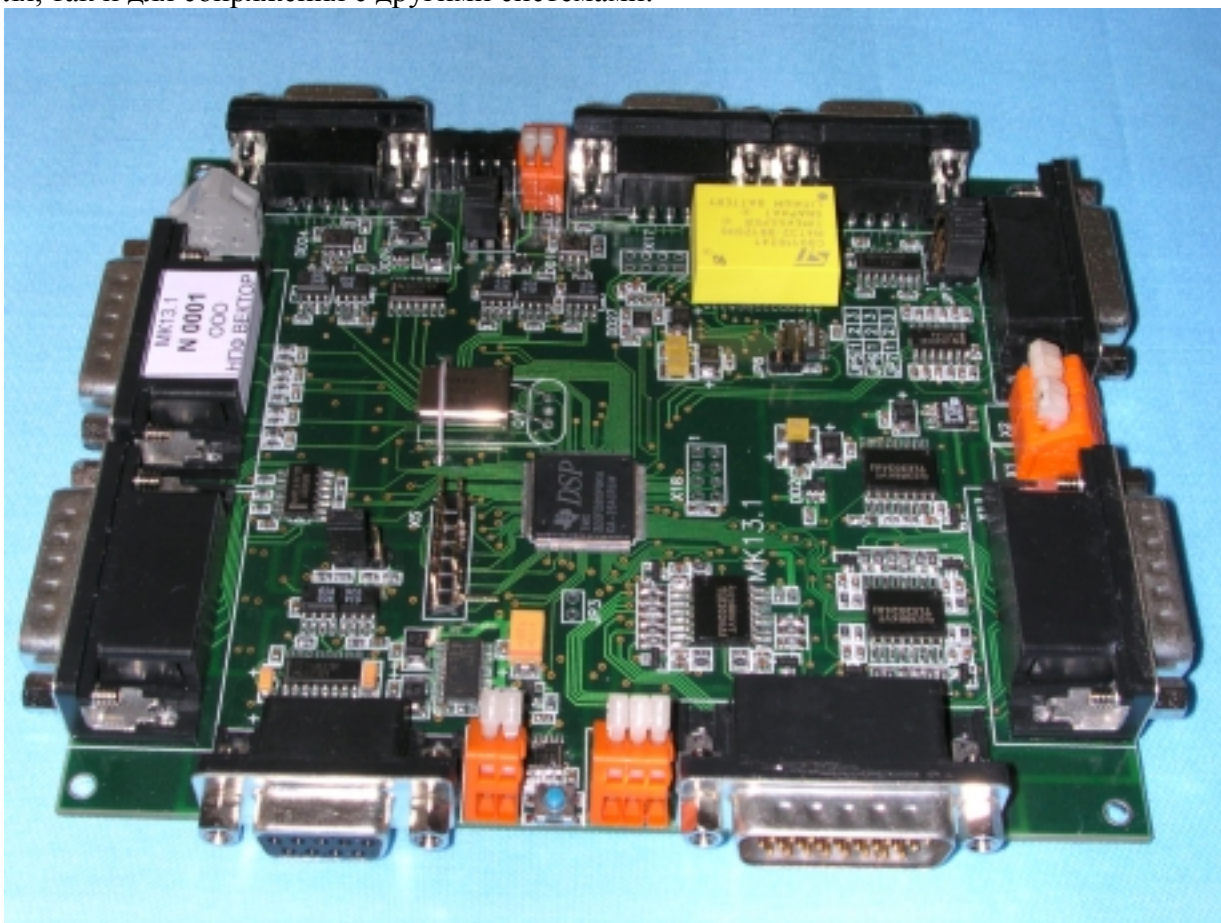


Рис. 4. Высокпроизводительный контроллер привода МК13.1

Контроллер допускает программирование непосредственно на языке высокого уровня СИ++ и отладку в реальном времени с регистрацией процессов на подключенном через внутрисхемный эмулятор компьютере.

Система привода не требует применения отвертки, паяльника или дополнительных приборов при настройке. Все операции тестирования и настройки выполняются с пульта в автоматическом или ручном режиме по выбору наладчика. «Заводские» настройки сохраняются в энергонезависимой памяти контроллера и могут быть при необходимости восстановлены. Для регистрации всех аварийных ситуаций и последующего анализа причин их возникновения предусмотрены часы реального времени. Контроллеры привода имеют полностью гальванически развязанные интерфейсы, что обеспечивает высокую помехозащищенность в сложных условиях эксплуатации. Допускается удаленное, в том числе по сети, изменение режимов работы и параметров привода.

Рассмотренный подход к созданию экскаваторных электроприводов позволяет обеспечить высокие регулировочные, энергетические, массо-габаритные показатели и надежность электроприводов. Он позволяет проектировать сложные системы как модульные с минимальным количеством соединений и установкой интеллектуальных систем управления либо непосредственно в оборудование, либо рядом с ним. Такой подход может обеспечить технологический прорыв в отрасли, так как предлагает принципиально новое качество систем привода.

#### Список литературы

1. Русаков А.М., Соломин А.Н. Разработки электромеханических систем на базе индукторных машин с аксиальным потоком// Состояние разработки и перспективы применения вентильно-индукторных приводов в промышленности и на транспорте: Тез. докл. Вторая международная конференция. – Москва, 14-15 июня. 2001.

2. Энергосберегающий комплектный электропривод производства ИБП РАН. «Приборы», №8, 2002г., Остриров В.Н.

3. Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Анучин А.С., Жарков А.А. Модульная микроконтроллерная система управления для отечественной серии преобразователей частоты «Универсал». Труды V-й Международной конференции «Электромеханика, электротехнология и электроматериаловедение» МКЭЭ-2003. Ч.1. Крым, -2003. с. 725-726.