

Современные системы управления электроприводов: структура и конструкция. Часть 2

Максим Сергеев, к. т. н. (smumail@yandex.ru)

Статья посвящена системам управления электроприводов, которые в настоящее время являются основным средством приведения в движение рабочих машин и других технических устройств. Излагаются основные сведения об электроприводах и их системах управления, предназначенных для управления преобразователем электрической энергии и электродвигателем – главными составными частями электропривода. Рассматриваются различные варианты структуры и конструкции систем управления электроприводов. Приводится описание универсального микроконтроллерного блока управления БУПЧ, который является основой систем управления преобразователями частоты для электроприводов большой и сверхбольшой мощности концерна «Русэлпром».

Введение

В первой части статьи указаны основные сведения об электроприводах (ЭП) и их системах управления (СУ ЭП). Главными составными частями ЭП являются преобразователь электрической энергии (силовое преобразовательное устройство – СПУ) и электродвигатель (ЭД). ЭД переменного тока подразделяются в основном на асинхронные (АД) и синхронные (СД). В ЭП переменного тока СПУ называется преобразователем частоты (ПЧ), в качестве которого наиболее широкое применение получили ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока на основе двух полупроводниковых преобразователей: управляемых (АВН) или неуправляемых выпрямителей напряжения и автономных инверторов напряжения (АИН). СПУ вместе с его СУ можно рассматривать как регулируемый источник питания (ИП), который питает ЭД или другую нагрузку. Современные СУ ЭП построены либо на базе высокопроизводительных микроконтроллеров (МК) с RISC-архитектурой или специализированных (для управления ЭП) цифровых сигнальных контроллеров (ЦСК), либо на базе программируемых логических микросхем (ПЛИС) или специализированных для этого применения микросхем (СИС).

Отмечено, что современные СУ ЭП имеют в основном распределённо-централизованную структуру и состоят из локальных СУ (ЛСУ), центральной СУ

(ЦСУ) и программируемого логического контроллера (ПЛК). Менее распространёнными являются СУ ЭП с централизованной структурой, когда высокоинтегрированный блок управления ЭП (ВБУ ЭП), в состав которого входят ЛСУ, ЦСУ и ПЛК, выполняет все функции СУ ЭП. Для управления технологическим процессом, рабочей машиной как его частью и, соответственно, ЭП применяется СУ более высокого уровня (СУ ВУ), которая называется СУ электроприводом (или электроприводами, если она управляет несколькими ЭП).

Рассмотрены различные варианты структуры СУ ЭП, отличающиеся элементной базой, схемотехникой и конструкцией.

Конструкция современных систем управления электроприводов переменного тока

В современных ЭП переменного тока конструкция ПЧ и СУ, которые ими управляют, имеет очень важное значение благодаря основным тенденциям в преобразовательной и микропроцессорной технике: повышению степени интеграции и функциональности и снижению массогабаритных характеристик, которые привели к тому, что совершенствованию конструкции стало уделяться повышенное внимание инженеров.

ПЧ для ЭП различных мощностей имеют разную конструкцию.

ПЧ малой мощности имеют компактное или встроенное исполнение. ПЧ средней мощности состоят из одного шкафа. ПЧ большой и сверхбольшой мощности состоят из нескольких шкафов (секций) – например, силовой секции (или секций, в которых расположены транзисторные преобразователи), секции фильтра, секции управления и др.

В ЭП малой мощности СУ выполняются либо на отдельной плате, либо объединяются на одной плате вместе с силовой частью, в результате чего получается одноплатный ПЧ, причём СУ может располагаться непосредственно на плате ПЧ или подключаться к ней как мезонинная плата². Преимуществами такого подхода являются снижение массогабаритных характеристик и стоимости ПЧ, а недостатками – большая техническая сложность и высокая трудоёмкость разработки, так как на одной плате, имеющей ограниченные габаритные размеры, нужно расположить силовые и информационные электронные компоненты, а также обеспечить их хорошую электромагнитную совместимость.

В ЭП средней, большой и сверхбольшой мощности СУ могут быть одноплатными или состоять из нескольких плат, расположенных в одном корпусе (блоке управления), причём электрическое соединение между этими платами осуществляется без проводов (платы расположены на минимальном расстоянии и имеют разъёмное соединение друг с другом), а корпус обычно является металлическим¹. Такой подход кро-

Примечание: ¹ СУ, имеющие не сосредоточенную (в виде блока), а распределённую конструкцию, в которых платы электрически соединяются друг с другом с помощью проводов (кабелей), особенно если они находятся на большом расстоянии друг от друга (более 25 см), желательно не применять в качестве СУ ЭП, так как они имеют низкие помехозащищённость и надёжность.

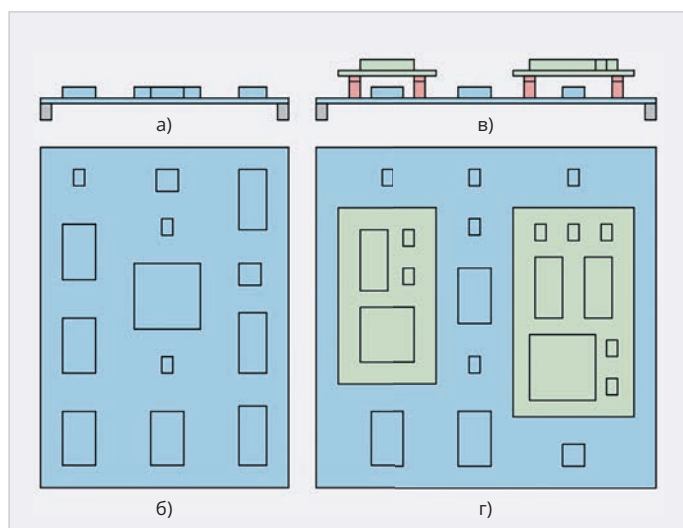


Рис. 1. Конструкция одноплатной СУ

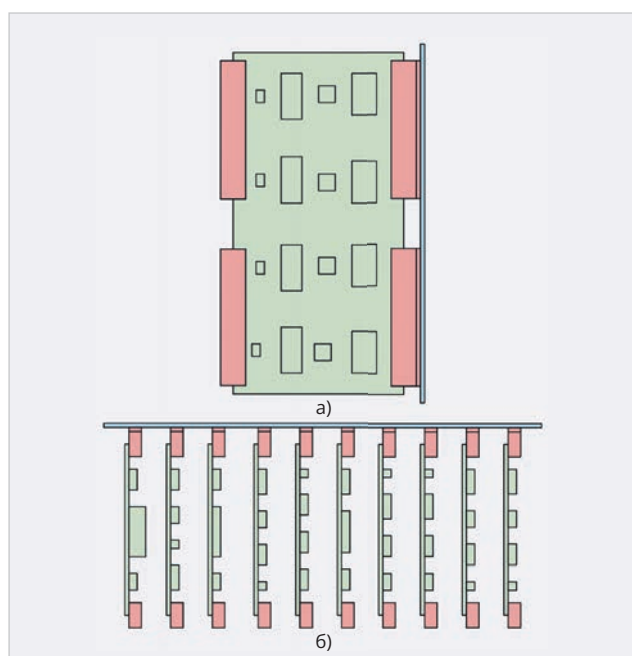


Рис. 3. Конструкция СУ с объединительной платой

ме уменьшения размеров СУ и увеличения количества функций, которые они выполняют, позволяет повысить помехозащищённость и надёжность СУ, что очень важно при управлении ПЧ, которые работают в условиях большого электромагнитного излучения.

СУ ЭП большой и сверхбольшой мощности в основном имеют распределённое размещение, когда ЛСУ располагаются в силовой секции (секциях), а ЦСУ и ПЛК – в секции управления. При этом ЛСУ, управляющие АВН и АИН, могут иметь каждая свой корпус или объединяться в одном корпусе. Но также возможен вариант, когда ЛСУ, ЦСУ и ПЛК объединены в одном корпусе и располагаются в секции управления (ВБУ ЭП).

Конструктивно, по количеству плат, входящих в их состав, СУ ЭП бывают двух типов:

- одноплатные СУ, когда их электронные компоненты расположены на одной печатной плате, и эта плата выполняет все системные функции (рис. 1);
- многоплатные СУ, когда их электронные компоненты расположены на нескольких (двух и более) печатных платах (рис. 2–6).

В свою очередь, многоплатные СУ ЭП можно разделить на следующие основные виды [14]:

- СУ с главной (материнской или системной) платой, которая выполняет основную часть системных функций (обработка информации, управление и контроль) и имеет

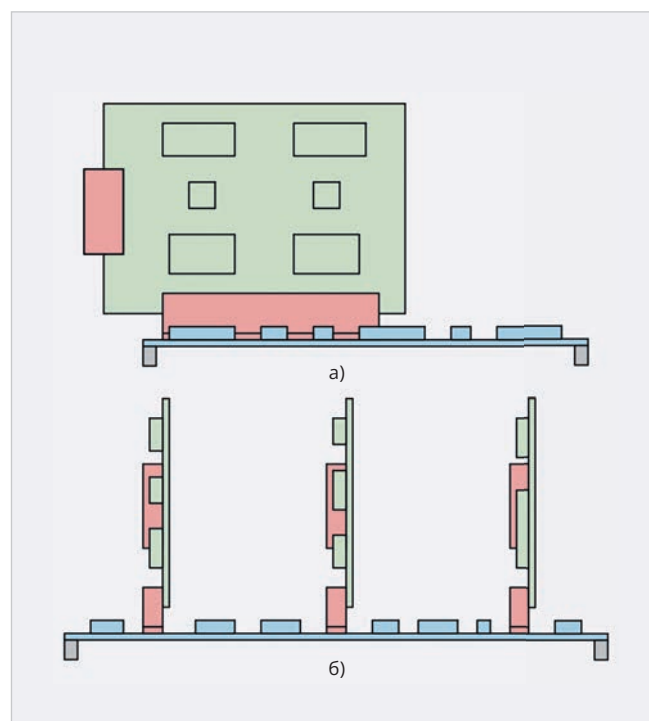


Рис. 2. Конструкция СУ с главной платой

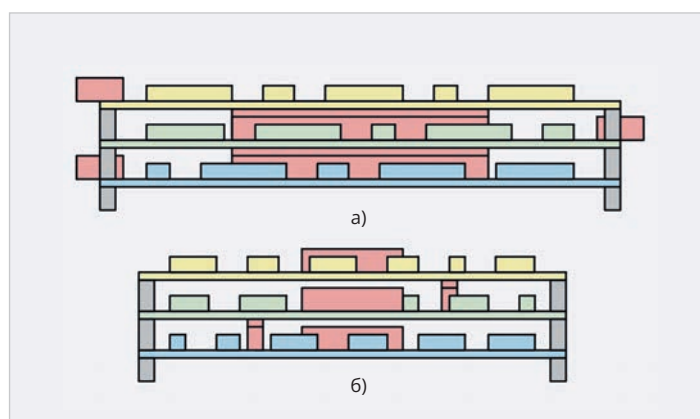


Рис. 4. Конструкция СУ с несколькими функциональными платами – вариант 1

разъёмы, к которым подключаются функциональные платы³, выполняющие определённые функции, в основном периферийные (например, плата дискретных входов/выходов, плата аналоговых входов/выходов, плата цифровых интерфейсов и т.д.) (рис. 2);

- СУ с объединительной платой (кросс-платой), которая предназначена для электрического соединения плат и имеет разъёмы, к которым подключаются функциональные модули⁴ (например, модуль ИП, модуль МК, модуль дискретных входов/выходов и т.д.) (рис. 3);
- СУ с несколькими функциональными платами (например, платой ИП, цифровой платой, аналоговой платой, платой интерфейсов и т.д.), ко-

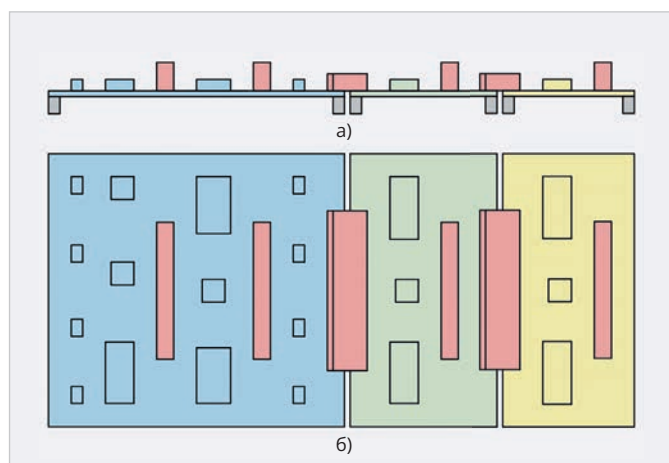


Рис. 5. Конструкция СУ с несколькими функциональными платами – вариант 2

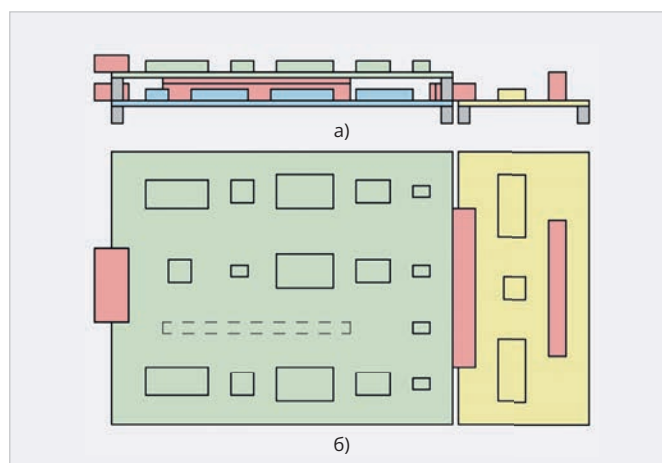


Рис. 6. Конструкция СУ с несколькими функциональными платами – вариант 3

торые выполняют определённые функции и электрически соединяются друг с другом с помощью разъёмов (рис. 4–6).

Конструкция СУ с несколькими функциональными платами имеет два основных варианта:

- платы имеют разъёмы с вертикальными контактами и устанавливаются параллельно друг другу одна над другой (вертикальное соединение), образуя вертикальную (объёмную, «многоэтажную») конструкцию (рис. 4);
- платы имеют разъёмы с горизонтальными контактами, расположенными вдоль края платы, и устанавливаются параллельно друг другу в одной плоскости (торцевое соединение), образуя горизонтальную (плоскую, «одноэтажную») конструкцию (рис. 5).

Возможно объединение этих двух вариантов (третий вариант), когда платы устанавливаются как одна над другой, так и в одной плоскости, образуя вертикально-горизонтальную конструкцию (рис. 6).

Примечания:

² Мезонинная плата (мезонин) представляет собой дополнительную плату, которая подключается к разъёму (разъёмам) основной платы и устанавливается параллельно ей (над ней). Возможно неразъёмное подключение мезонина к основной плате, когда он припаивается к ней.

³ Функциональные платы устанавливаются перпендикулярно главной плате.

⁴ Функциональные модули представляют собой функциональные платы с лицевыми панелями и устанавливаются перпендикулярно кросс-плате.

На рис. 1 показаны два варианта конструкции одноплатной СУ: рис. 1а (вид спереди), рис. 1б (вид сверху) – безмезонинный вариант; рис. 1в (вид спереди), рис. 1г (вид сверху) – вариант с двумя мезонинами. На рис. 2 представлена конструкция СУ с главной платой: рис. 2а – вид справа, рис. 2б – вид сзади. На рис. 3 показана конструкция СУ с объединительной платой: рис. 3а – вид справа, рис. 3б – вид сверху. На рис. 4–6 представлены три варианта конструкции СУ с несколькими функциональными платами: рис. 4а (вид справа), рис. 4б (вид сзади) – вариант 1; рис. 5а (вид справа), рис. 5б (вид сверху, повернутый) – вариант 2; рис. 6а (вид справа), рис. 6б (вид сверху, повернутый) – вариант 3. На этих рисунках зелёным, синим и жёлтым цветами показаны платы, входящие в состав СУ, красным цветом – разъёмы, серым цветом – крепежные стойки.

Широко применяется вариант одноплатных СУ с одной или несколькими мезонинными платами, которые выполняют определённые функции. Например, могут быть мезонины, на которых расположены МК или ПЛИС, мезонины с микросхемами памяти или светодиодами и т.д. При этом мезонинные платы могут располагаться на верхней стороне основной платы, на нижней её стороне или на обеих её сторонах. В многоплатных СУ отдельные платы также могут иметь в своём составе мезонины.

Примером одноплатной конструкции СУ ЭП является одноплатная СУ ОМПСУ фирмы АО «НПП «СЭС» (рис. 7). Блок управления фирмы Danfoss (плата управления Control Board NX и набор функциональных плат) явля-

ется примером конструкции СУ ЭП с главной платой (рис. 8). Примером конструкции СУ ЭП с объединительной платой является универсальный блок управления БУПЧ фирмы АО «НПП «СЭС» (рис. 9).

Конструкция СУ ЭП с несколькими функциональными платами имеет следующие особенности. В первом варианте при увеличении количества плат СУ увеличивается в высоту, а её длина и ширина не изменяются, образуя «этажерку». Возможны подварианты, когда отдельные платы, входящие в «этажерку», отличаются от остальных плат по длине или ширине. Примерами такой конструкции СУ являются блок управления AR2515/AR2516⁵ фирмы Ingeteam (рис. 10) и устройства, базирующиеся на стандарте PC/104 (рис. 11). Во втором варианте увеличение количества плат СУ приводит к увеличению её длины, а высота и ширина не изменяются. Здесь также возможны подварианты, когда ширина отдельных плат отличается от ширины остальных плат. ПЛК INGESYS IC2 фирмы Ingeteam служит примером такой конструкции СУ (рис. 12). В третьем варианте при увеличении количества плат СУ происходит её увеличение как в высоту, так и в длину. Примером такой конструкции СУ является блок управления AR2105⁶ фирмы Ingeteam (рис. 13).

Преимуществами одноплатных СУ по сравнению с многоплатными является то, что они проще, дешевле и компактнее. Но их функциональность ниже, чем у многоплатных СУ, и применяются они чаще всего в качестве ЛСУ и в ЭП малой и средней мощности.

Преимуществами СУ на основе главной платы являются их гибкость и

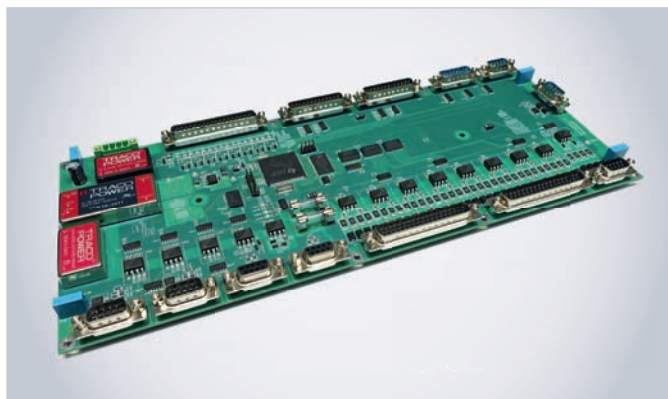


Рис. 7. Одноплатная СУ ОМПСУ фирмы АО «НПЦ «СЭС»

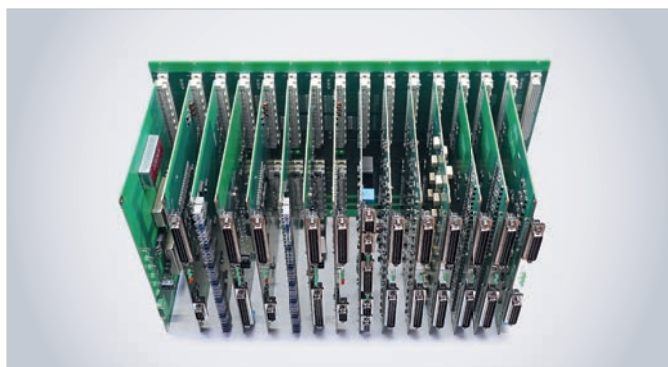


Рис. 9. Блок управления БУПЧ фирмы АО «НПЦ «СЭС» (без корпуса)

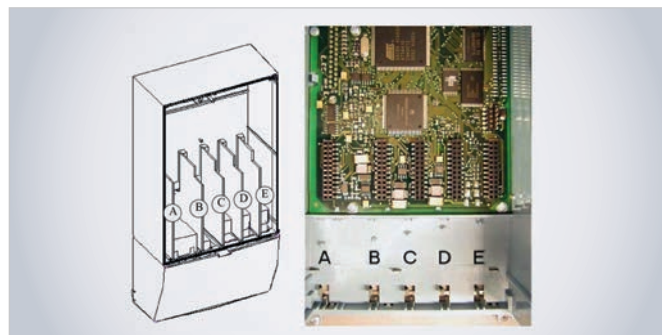


Рис. 8. Блок управления на основе платы Control Board NX фирмы Danfoss



Рис. 10. Блок управления AR2515/AR2516 фирмы Ingeteam

более низкая стоимость, так как для каждого проекта (объекта управления) подбираются свои функциональные платы, и получается оптимальная (по набору плат и выполняемым функциям) для данного проекта СУ.

Основным преимуществом СУ на основе объединительной платы является их высокая ремонтпригодность, так как можно очень быстро заменить функциональный модуль, который вышел из строя.

Преимуществами СУ на основе нескольких функциональных плат являются их более высокая компактность и более низкая трудоёмкость разработки по сравнению с СУ на основе главной и объединительной плат.

При разработке конструкции (топологии) печатных плат (ПП), входящих в состав СУ ЭП, для обеспечения высо-

кой помехозащищённости и надёжности СУ необходимо соблюдать следующие основные правила:

- должны применяться только многослойные ПП (количество слоёв – не менее четырёх), которые позволяют использовать внутренние слои для организации питания платы в виде плоскостей (полигонов), что значительно увеличивает помехозащищённость СУ;
- информационные входы/выходы плат СУ (дискретные входы/выходы, аналоговые входы/выходы, цифровые интерфейсы, аналоговые интерфейсы, входы/выходы для управления IGBT-транзисторами) должны быть гальванически изолированы друг от друга и от МК (ПЛИС или СИС), и, соответственно, на ПП они должны быть раз-

делены с помощью диэлектрических зазоров;

- должно быть обеспечено раздельное цифровое питание (для цифровых микросхем и их обвязки) и аналоговое питание (для аналоговых микросхем и их обвязки) СУ, а их общие проводники (0 В, «земли») на

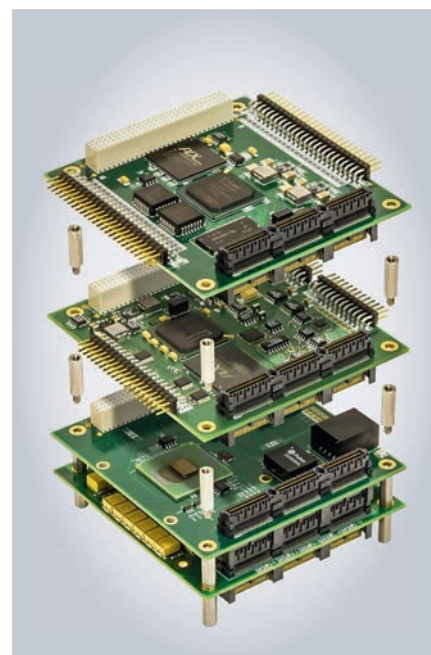


Рис. 11. СУ, выполненная по стандарту PC/104

Примечания:

⁵ Блок управления AR2515/AR2516 имеет трёхэтажную конструкцию и состоит из трёх функциональных плат, расположенных одна над другой: платы ИП (нижней, на фотографии она не видна), цифровой платы (средней), имеющей два мезонина, и аналоговой платы (верхней).

⁶ Блок управления AR2105 имеет сложную конструкцию и состоит из трёх функциональных плат: микропроцессорной платы (нижней, на фотографии она не видна), расположенной над ней основной платы, имеющей четыре мезонина (два из которых установлены на её верхней стороне, а два – на нижней стороне), и платы ИП (она расположена в стороне от основной платы, а не над ней).

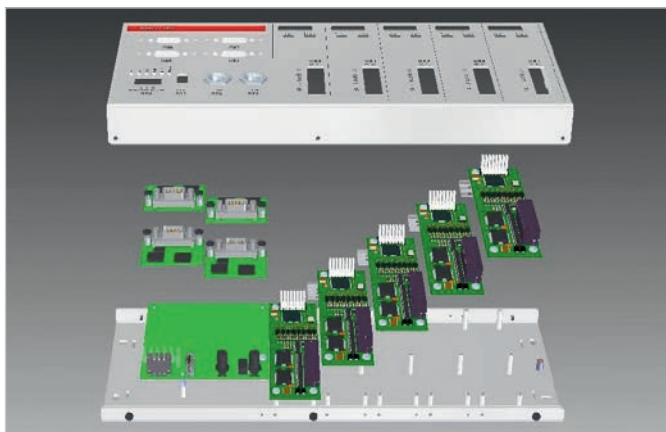


Рис. 12. ПЛК INGESYS IC2 фирмы Ingeteam



Рис. 13. Блок управления AR2105 фирмы Ingeteam

ПП нужно соединить в одной точке – около МК⁷;

- цифровое питание СУ должно быть разделено на две части: «чистое», которое питает МК (ПЛИС или СИС), микросхемы памяти и другие вспомогательные для МК микросхемы, и «грязное», которое питает микросхемы приёмников/передатчиков и буферные микросхемы, предназначенные для приёма/передачи и согласования уровней сигналов, поступающих на информационные входы/выходы, а их общие проводники (0 В, «земли») на ППП нужно соединить в одной точке – около источника питания;
- электронные компоненты на ППП необходимо располагать на обеих её сторонах и максимально компактно для того, чтобы длина проводников и размеры ППП были минимальными;
- длина информационных проводников должна быть как можно меньше⁸: чем меньше длина проводников, тем меньше вероятность наведения в них электромагнитных помех.

Пример правильной конструкции (топологии) ППП для СУ ЭП показан на рис. 14. На этом рисунке жёлтым цветом показано «чистое» цифровое питание (для цифровой части МК), зелёным цветом – аналоговое питание (для аналоговой части МК), синим цветом – «грязное» цифровое питание (для микросхем приёмников/передат-

чиков и буферных микросхем), фиолетовым цветом – питание входной части ИП, красным цветом – разъёмы, белым цветом – диэлектрические зазоры; 1 – МК, 2 – модульный ИП. Квадратами серого цвета показаны электрические соединения общих проводников (0 В, «земля») аналогового и «чистого» цифрового питания, а также «чистого» и «грязного» цифрового питания.

В области создания СУ ЭП есть интересная тенденция, или, правильнее сказать, особенность: каждая фирма-производитель ПЧ для управления ими использует СУ собственной разработки и изготовления. Например, ведущие западные фирмы-производители преобразовательной техники, такие как ABB, Danfoss, Ingeteam, Siemens, имеют собственные СУ ЭП. В нашей стране тоже каждая фирма-производитель ПЧ для управления ими старается применять собственную СУ.

Приведённые выше западные фирмы производят широкий ряд СУ, которые управляют ЭП различной мощности – от нескольких десятков кВт до нескольких МВт [18–21]:

- ABB – VCU-11, VCU-12, VCU-22, UCU-23, UCU-24;
- Danfoss – плата управления Control Board NX (главная плата) и большой набор функциональных плат, например, OPT-A1, OPT-A2, OPT-A5, OPT-B8, OPT-C2, OPT-C6, OPT-C1;
- Ingeteam – AR2105, AR2110, AR2515/AR2516, AR2531, AR2532;
- Siemens – CU230P-2, CU240B-2, CU240E-2, CU250S-2, CU310-2, CU320-2.

Плата управления Control Board NX включает в себя ЛСУ и ЦСУ, она построена на базе СИС фирмы Microchip (ЛСУ) и МК фирмы NXP (ЦСУ).

Блок управления AR2105 является ЦСУ, он реализован на основе микро-

процессора фирмы AMD, ЦСК фирмы Analog Devices и ПЛИС фирмы Altera. Блок управления AR2515/AR2516 является ЛСУ и построен на базе ПЛИС фирмы Altera. Блок управления AR2110 представляет собой ВБУ ЭП и включает в себя ЛСУ, ЦПУ и ПЛК. Блоки управления AR2531 и AR2532 являются одноплатными ЛСУ, реализованными на основе ПЛИС фирмы Altera. При этом блок AR2531 имеет мезонин, на котором располагаются оптические микросхемы, а блок AR2532 имеет безмезонинную конструкцию.

Блоки управления фирмы Siemens построены в основном на базе МК фирмы Infineon.

Российский микроконтроллерный блок управления ПЧ для ЭП большой и сверхбольшой мощности

В настоящее время, в условиях сжатых сроков поставки промышленного электрооборудования, любому предприятию, которое занимается разработкой и изготовлением ПЧ для ЭП, хотелось бы иметь максимально функционально законченное, проверенное и надёжное СПУ в виде блока (силового модуля) и универсальную СУ ЭП, которые подойдут для большинства или даже для всех проектов. Такой подход позволяет быстро конструировать ПЧ различной мощности из готовых модульных СПУ и сосредоточиться в основном на разработке алгоритмического обеспечения и программного обеспечения (ПО).

Примером такого подхода является ПЧ мощностью 1,67 МВ·А на основе собственного высокоинтеллектуального силового модуля ТТМ-1000, разработанный инженерами концерна «Русэлпром» в 2022 году, кото-

Примечания:

⁷ При использовании ПЛИС цифровые и аналоговые цепи должны объединяться на ППП около аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

⁸ Желательно, чтобы длина информационных проводников не превышала 15 см.

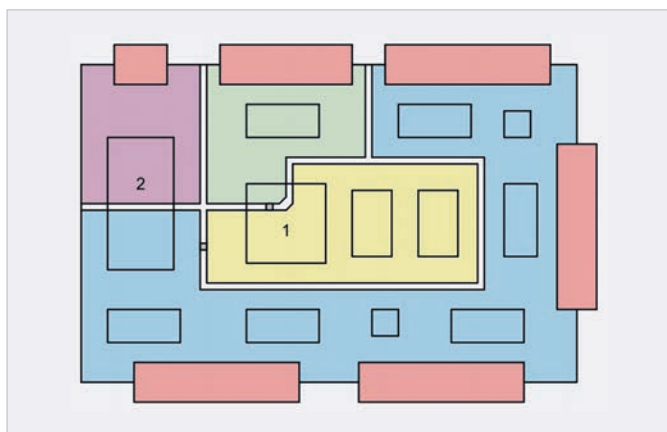


Рис. 14. Правильная конструкция (топология) ПП для СУ ЭП



Рис. 15. Блок управления БУПЧ

рый является базовым ПЧ для ЭП большой и сверхбольшой мощности этого концерна. На его основе создан ряд ПЧ мощностью от 600 кВт до 4,5 МВт, которые предназначены в основном для управления АД. Также они могут применяться для управления СД и в качестве регулируемых ИП для трёхфазных потребителей электроэнергии [16].

Основой СУ этих ПЧ является универсальный микроконтроллерный блок управления, разработанный инженерами АО «НПЦ «СЭС» (концерн «Русэлпром»), – блок управления БУПЧ (далее – БУПЧ), объединивший в своём составе две ЛСУ, ЦСУ и ПЛК. Технические условия на этот блок управления⁹ одобрены Российским морским регистром судоходства, а сам БУПЧ имеет Свидетельство о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства [15].

Блок управления БУПЧ имеет централизованную архитектуру с внутренним распределением функций и состоит из трёх микроконтроллерных систем управления (МКСУ), расположенных в одном корпусе: двух ЛСУ – контроллеров АВН (КАВ) и АИН (КИН) – и контроллера ввода/вывода сигналов (КВВ), который выполняет функции ЦСУ и ПЛК.

Связь между тремя контроллерами БУПЧ осуществляется с помощью высокоскоростного последовательного интерфейса SPI, при этом контроллеры КАВ и КИН являются подчинёнными, а контроллер КВВ – главным, координирующим работу КАВ и КИН. Внешний вид БУПЧ показан на рис. 15.

Контроллер КАВ осуществляет управление, контроль и защиту АВН: измерение напряжений и токов входной сети, напряжения в звене постоянного тока и температуры IGBT-модулей, обработку результатов этих

измерений и формирование сигналов управления IGBT-транзисторами с помощью специализированного алгоритма (векторное управление).

Контроллер КИН осуществляет управление, контроль и защиту АИН: измерение напряжений, токов и скорости вращения АД, напряжения в звене постоянного тока и температуры IGBT-модулей, обработку результатов этих измерений и формирование сигналов управления IGBT-транзисторами с помощью специализированного алгоритма (векторное управление).

Контроллер КВВ управляет контроллерами КАВ и КИН, а также координирует их работу, осуществляет ввод/вывод дискретных и аналоговых сигналов, реализует цифровые и аналоговые интерфейсы, осуществляет информационное взаимодействие с пультом управления и индикации (ПУИ) и СУ ВУ, управление и контроль систем охлаждения ПЧ и ЭД.

БУПЧ имеет блочно-модульную конструкцию, состоящую из блочного каркаса (крейта), в котором расположены объединительная плата (кросс-плата) и следующие функциональные модули (рис. 16):

- модуль источников питания (ИП);
- модуль микроконтроллера (МК);
- модуль широтно-модулированных выходов (ШИМ);
- модуль датчиков напряжения и тока (ДНТ);
- модуль цифровых интерфейсов и датчиков скорости (ЦИДС);
- модуль дискретных входов (ДВх);
- модуль дискретных выходов (ДВых);
- модуль датчиков температуры (ДТ);
- модуль аналоговых интерфейсов (АИ).

Конструкция каждого модуля состоит из соответствующей платы (имеющей такое же название) и лицевой

панели. С передней стороны плат расположены разъёмы для подключения источников питания и внешних сигналов, а также светодиодные индикаторы. С задней стороны плат расположены разъёмы для подключения модулей к объединительной плате.

В состав контроллеров КАВ и КИН входят модули МК, ШИМ и ДНТ. В состав контроллера КВВ входят модули МК, ЦИДС, ДВх, ДВых, ДТ и АИ.

Модуль МК является обязательным и единственным для каждого контроллера, другие модули могут иметь разное количество, а также могут не входить в его состав. Базовое количество модулей, входящих в состав БУПЧ, равно 16, а максимально возможное количество – 17.

Блок управления БУПЧ позволяет управлять четырьмя транзисторными преобразователями (например, двумя АВН и двумя АИН), а также осуществлять ввод/вывод дискретных и аналоговых сигналов и реализовывать цифровые и аналоговые интерфейсы. Поэтому он может применяться в двухканальных ПЧ, которые управляют двумя обычными АД, а также в ПЧ для двухобмоточных АД.

Прототипами БУПЧ можно считать блоки управления AR2105 (рис. 13) и AR2515/AR2516 (рис. 10) фирмы Ingeteam, которые предназначены для управления транзисторными преобразователями. Эти блоки управления работают совместно: блок AR2105 (Control Processing Unit) является ЦСУ и управляет одним или несколькими (до четырёх) блоками AR2515/AR2516, а также координирует их работу; блок AR2515/AR2516 (Power Management Module) является ЛСУ и управляет одним или двумя трёхфазными транзисторными преобразователями, а также тормозными транзисторами.

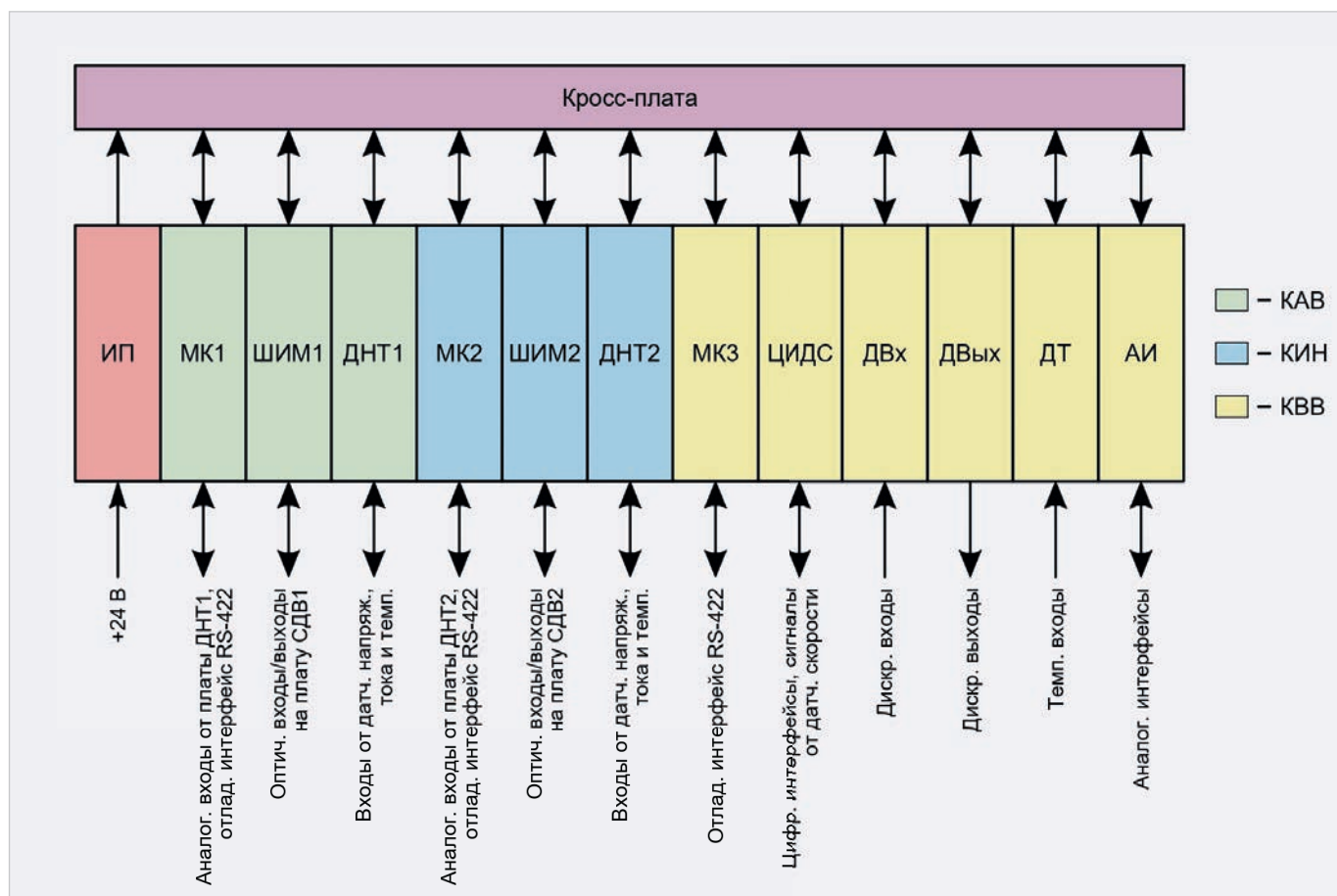


Рис. 16. Структурная схема БУПЧ

Для управления ПЧ требуется блок AR2105 (он управляет блоками AR2515/AR2516 и координирует их работу) и два блока AR2515/AR2516 (один из них управляет АВН, а второй – АИН).

По количеству подключаемых датчиков напряжения, тока и температуры, дискретных входов/выходов, цифровых и аналоговых интерфейсов, оптических входов/выходов для управления IGBT-транзисторами блок управления БУПЧ превосходит блоки управления AR2105 и AR2515/AR2516 – один БУПЧ может заменить блок AR2105 и два блока AR2515/AR2516.

БУПЧ по сравнению с большинством российских и зарубежных СУ ЭП является универсальным устройством и имеет высокую степень интеграции (он является ВБУ ЭП), что позволяет ему управлять различными ЭП и обходиться без ПЛК и специальных плат расширения. Поэтому его разработка, в которой автор принимал активное участие, оказалась очень непростой задачей, решение которой требовало высокой квалификации и большого опыта.

Блоки управления БУПЧ успешно применяются для управления ЭП

мощностью от 600 кВт до 4,5 МВт, которые эксплуатируются на следующих судах:

- суда с валогенераторной установкой;
- океанографические исследовательские суда;
- дизель-электрический ледокол;
- круизное пассажирское судно проекта PV300VD (замена СУ ПЧ ГЭД¹⁰ и СУ ПЧ ПУ¹¹ фирмы Ingeteam на БУПЧ).

На стадии реализации находятся проекты аварийно-спасательных судов и дизель-электрических ледоколов, в которых БУПЧ управляют ЭП мощностью от 1,1 МВт до 4,5 МВт.

Заключение

Современные СУ ЭП имеют в основном распределённо-централизованную структуру и состоят из ЛСУ, ЦСУ и ПЛК. При этом ЛСУ и ЦСУ являются обязательными частями СУ ЭП, а ПЛК – необязательной частью; он используется для увеличения количества входов/выходов и интерфейсов. При повышении степени интеграции СУ ЭП – объединении ЛСУ, ЦСУ и ПЛК в одном корпусе – получится ВБУ ЭП, который будет выполнять все функции СУ ЭП. Он имеет централизо-

ванную структуру с внутренним распределением функций, состоящую из нескольких частей – СУ (контроллеров), каждая из которых выполняет определённую функцию. Можно с уверенностью сказать, что в будущем сохранятся и будут развиваться СУ ЭП с обеими этими структурами, хотя более распространёнными останутся СУ ЭП с распределённо-централизованной структурой.

Управление ЭП является многоуровневой и иерархической задачей, которую осуществляет комплекс управления ЭП. В его состав входят как минимум четыре уровня управления: драйверы IGBT-транзисторов (нижний уровень), ЛСУ, ЦСУ и СУ ВУ (верхний уровень). А в сложных технологических процессах количество уровней управления может быть ещё больше, и СУ ВУ сама может являться подсистемой для СУ ещё более высокого уровня.

Примечания:

⁹ ФБРТ.426469.001ТУ. Блок управления БУПЧ. Технические условия: введены впервые, 75 с.

¹⁰ ГЭД – гребной электродвигатель.

¹¹ ПУ – подруливающее устройство.

Для реализации современных алгоритмов управления ЭП переменного тока, требующих быстродействующих контуров регулирования тока (момента), ЛСУ должны иметь высокое быстродействие, поэтому их можно реализовать либо на базе высокопроизводительных МК с RISC-архитектурой или специализированных ЦСК, либо на базе ПЛИС или СИС. ЦСУ могут быть реализованы на базе МК с RISC-архитектурой, имеющих среднюю производительность. В настоящее время ПЛИС и СИС активно развиваются, поэтому с достаточной степенью уверенности можно предположить, что в будущем их применение в СУ ЭП будет увеличиваться.

Существует пять основных вариантов структуры СУ ЭП, которые отличаются реализацией ЛСУ и ЦСУ. В них ЛСУ могут быть реализованы на базе МК или ПЛИС (СИС), а ЦСУ – на базе МК или ПЛК. Эти варианты построения СУ ЭП имеют несколько подвариантов, которые отличаются количеством плат, на которых они расположены.

По конструкции СУ ЭП бывают одноплатными и многоплатными. В свою очередь, многоплатные СУ ЭП можно разделить на три основных вида: с главной (материнской или системной) платой, с объединительной платой (кросс-платой) и с несколькими функциональными платами.

При разработке конструкции (топологии) печатных плат (ПП), входящих в состав СУ ЭП, необходимо соблюдать определённые правила, которые позволяют обеспечить их высокую помехозащищённость и надёжность.

Каждый из вариантов структуры и конструкции СУ ЭП имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Для каждого проекта желательно создать оптимальные структуру и конструкцию СУ ЭП, а критериями оптимальности могут быть следующие её характеристики и показатели: массогабаритные характеристики, себестоимость, удельная функциональность и функциональная себестоимость. Можно с уверенностью сказать, что в будущем, в процессе развития СУ ЭП, такой показатель, как удельная функциональность, будет повышаться, а функциональная себестоимость, наоборот, будет снижаться.

В 2022 году концерном «Русэлпром» разработан ПЧ мощностью 1,67 МВ·А, на базе которого создан ряд ПЧ для ЭП мощностью от 600 кВт до 4,5 МВт.

Основой СУ этих ПЧ является универсальный микроконтроллерный блок управления, разработанный инженерами АО «НПП «СЭС» (концерн «Русэлпром»), – блок управления БУПЧ, объединивший в своём составе две ЛСУ, ЦСУ и ПЛК, который позволяет управлять четырьмя транзисторными преобразователями (например, двумя АВН и двумя АИН).

Одним из главных достоинств БУПЧ является его универсальность, которая позволяет успешно применять его для замены СУ ЭП западного производства, поддержка которых в последнее время полностью отсутствует на территории Российской Федерации. Например, инженерами концерна «Русэлпром» были успешно заменены СУ ПЧ ГЭД и СУ ПЧ ПУ фирмы Ingeteam на блоки управления БУПЧ на круизном пассажирском судне проекта PV300VD. При этом в ПЧ ГЭД один БУПЧ заменил два блока управления фирмы Ingeteam – AR2105 и AR2516, а в ПЧ ПУ один БУПЧ заменил три блока управления фирмы Ingeteam – AR2105 и два AR2532.

Литература

1. Абакумов А.М. Электрический привод. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока: учеб. пособ. / А.М. Абакумов, П.В. Тулупов, Ю.А. Чабанов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 123 с.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 373 с.
3. Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: структуры и алгоритмы: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 219 с.
4. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 606 с.
6. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
7. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов.

2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2003. 224 с.

8. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 544 с.
9. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // Новости о микросхемах. CHIP NEWS. 1999. № 1 (34). С. 2–10.
10. Козаченко В.Ф. Микроконтроллерные системы управления электроприводами: современное состояние и перспективы развития. URL: <http://www.motorcontrol.ru>.
11. Медведев В.А. Конструирование преобразователей: электронное учеб. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 159 с.
12. Мелишин В., Овчинников Д. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
13. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 368 с.
14. Сергеев М.Ю. Современное состояние и перспективы развития преобразователей частоты для судовых систем электродвижения // Российская Арктика. 2025. Т. 7. № 2. С. 23–36.
15. Сергеев М., Улитовский Д. БУПЧ – высокоинтегрированный микропроцессорный блок управления для судовых преобразователей частоты // Силовая электроника. 2025. № 2. С. 22–29.
16. Сергеев М., Никулкин К., Максимов А. ТТМ-1000 – высокоинтеллектуальный силовой модуль для судовых преобразователей частоты // Силовая электроника. 2025. № 3. С. 28–35.
17. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
18. ABB Industrial Drives. BCU-02/12/22 control units: Hardware manual. 34 p. URL: <http://www.abb.com>.
19. INGEDRIVE. Control Components: User manual. 59 p. URL: <http://www.ingeteam.com>.
20. SINAMICS. S120 AC Drive: Manual. 500 p. URL: <http://www.siemens.com>.
21. Vacon NX AC Drives. Basic I/O boards, Expander I/O boards, Adapter boards: User manual. 84 p. URL: <http://www.danfoss.com>.

