

УДК 621.314.26:62-83

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Бурдасов Борис Константинович**

кандидат технических наук

ЗАО «Конвертор», Саранск

**Нестеров Сергей Александрович**

кандидат технических наук

**Федотов Юрий Борисович**

кандидат технических наук

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

*author@apriori-journal.ru*

**Аннотация.** Описаны преимущества частотного регулирования электроприводов переменного тока. Рассмотрены основные системы высоковольтных преобразователей частоты (ПЧ) на базе автономных инверторов напряжения: ПЧ прямого преобразования, ПЧ с низковольтным звеном, многоуровневые и каскадные ПЧ. Отмечаются преимущества каскадных ПЧ, имеющих высокий КПД и коэффициент мощности и обеспечивающих высокое качество выходного напряжения и потребляемого из сети тока.

**Ключевые слова:** частотно-регулируемый электропривод; преобразователи частоты; многоуровневые преобразователи; каскадные преобразователи.

# FREQUENCY CONVERTERS FOR HIGH VOLTAGE AC MOTOR DRIVES

**Burdasov Boris Konstantinovich**

candidate of technical sciences

Closed corporation «Convertor», Saransk

**Nesterov Sergey Alexandrovich**

candidate of technical sciences

**Fedotov Yuri Borisovich**

candidate of technical sciences

Ogaryov Mordovia State University, Saransk

**Abstract.** This paper describes advantages of AC motor drives frequency control. It discusses basic high voltage frequency converter (FC) systems with voltage source inverters: conventional FC with DC link, FC with intermediate low voltage link, multilevel and multistage converters. It observed that multistage converters have higher reliability, high efficiency and power factor and provide high quality of output voltage and input current.

**Key words:** frequency control motor drive; frequency converters; multilevel converters; multistage converters.

Прямой пуск высоковольтных асинхронных и синхронных электродвигателей с напряжением питания 6 или 10кВ сопровождается броском пускового тока, достигающим 6-8-кратного значения по отношению к номинальному току двигателя.

Эти броски тока вызывают большие электромагнитные и механические ударные нагрузки на двигатели и на приводимые ими исполнитель-

ные механизмы. Многократные ударные нагрузки приводят к выходу из строя дорогостоящего технологического оборудования и к значительным затратам на его ремонт. Кроме того, прямой пуск приводит к глубоким посадкам напряжения питающей сети при каждой операции пуска, что отрицательно сказывается на устойчивости работы других потребителей.

Сегодня непрерывно растет число предприятий, рассматривающих применение электроприводов с регулируемой частотой вращения как ключ к энергосбережению, повышению рентабельности предприятия, улучшению экологической обстановки.

Вентильные высоковольтные преобразователи частоты предназначены для частотного пуска и регулирования скорости вращения высоковольтных электродвигателей, мощностью 250-5000 кВт [1]. Они преобразуют электрическую энергию трехфазной сети переменного тока промышленной частоты напряжением 3, 6 или 10 кВ в трехфазное напряжение с параметрами частоты и напряжения, изменяемыми по закону частотного регулирования. Существует четыре основные схемы построения вентильных преобразователя со звеном постоянного тока: прямого преобразования ПЧСВ; с низковольтным звеном ПЧСН; многоуровневые; каскадные.

**Электропривод прямого преобразования ПЧСВ** находит применение, если напряжение питающей сети и номинальное напряжение двигателя соответствуют напряжению преобразователя частоты [2]. Функциональная схема такого электропривода показана на рис. 1. Он включает в себя высоковольтный выпрямитель В, инвертор И и сглаживающие дроссели Д в звене постоянного тока. Нагрузкой инвертора является приводной двигатель М.

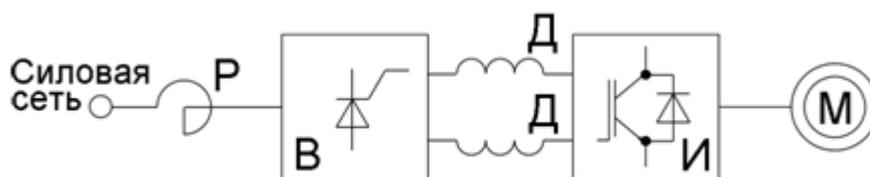


Рис. 1 Электропривод прямого преобразования ПЧСВ.

Для симметрирования силовой схемы преобразователя сглаживающие дроссели выполняются с расщепленной обмоткой (с двумя полуобмотками). Обмотки дросселя включаются последовательно в оба полюса звена постоянного тока. Возможно применение двух независимых дросселей. Такое построение позволяет снизить воздействие на изоляцию двигателя по отношению к земле. Входной реактор  $R$  предназначен для ограничения аварийных токов короткого замыкания на безопасном для силовых приборов уровне.

Силовые схемы управляемого выпрямителя и инвертора построены на базе трехфазных мостов. Каждое из шести вентильных плеч выпрямителя (инвертора) составлено из  $n$  последовательно включенных вентилях (тиристоров и IGBT-транзисторов). Число вентилях зависит от класса питающего напряжения. Силовые вентилях, характеризующиеся разбросом заряда восстановления, шунтируются цепями динамического распределения напряжения по последовательно включенным вентилях при коммутации. Параметры цепей распределения выбраны с учетом максимальной величины разброса заряда восстановления при максимальной нагрузке, а также с учетом параметров нелинейного токоограничивающего дросселя, включенного в каждую вентильную цепь. Для повышения надежности и исключения развития аварии осуществляется контроль целостности индивидуально каждого силового вентилях.

**Преобразователи частоты с низковольтным звеном ПЧСН** аналогичны по принципу действия, функциональным возможностям, назначению и области применения высоковольтным преобразователям частоты ПЧСВ. Преобразователи ПЧСН являются альтернативой преобразователям ПЧСВ для достаточно узкого диапазона электроприводов с синхронными двигателями мощностью от 320 до 1600 кВт [3]. Для этого диапазона мощностей оказалось выгодно снизить рабочее напряжения преобразователя. И хотя снижение рабочего напряжения требует установки понижающего трансформатора на входе и повышающего транс-

форматора на выходе преобразователя, общий экономический эффект очевиден. Так, например, для синхронного двигателя мощностью 1600 кВт удельная цена одного кВт мощности при приобретении комплектного ПЧСВ составляет 106 \$, а при применении комплектного ПЧСН – 64 \$.

Такой экономический эффект объясняется следующими причинами:

а) снижение рабочего напряжения преобразователя позволяет установить по одному вентилю в плечах выпрямителя и инвертора. Для рабочего напряжения 6 кВ необходимо установить несколько приборов последовательно, при этом из-за возможного неравномерного деления напряжения при последовательном включении рабочее напряжение вентиляей должно снижаться.

б) при рабочем напряжении 6 кВ все изоляционные расстояния и промежутки в шкафу преобразователя должны увеличенными в соответствии с действующими правилами. Поэтому габарит щита высоковольтного преобразователя (в основном за счет площади) будет в 2,5...3 раза больше, чем низковольтного.

в) в высоковольтном преобразователе отсутствуют входной и выходной трансформаторы, но необходимы входной токоограничивающий реактор и высоковольтный сглаживающий дроссель. Габариты данных устройств соответствуют габаритам трансформаторов мощностью 450-700 кВА.

г) высоковольтный преобразователь более сложен не только по силовой схеме, но и по системе управления из-за необходимости высоковольтной раздачи импульсов, контроля целостности силовых полупроводниковых приборов на стороне высокого напряжения и двойного потенциального разделения (по требованиям техники безопасности) датчиков тока и напряжения. Указанные обстоятельства усложняют эксплуатацию высоковольтного преобразователя частоты.

В ПЧСН напряжение питающей сети 6 кВ подается на понижающий силовой трансформатор, который преобразует его в трёхфазное напря-

жение 0,4 или 0,66 кВ. Данное напряжение подается на низковольтный преобразователь частоты, где преобразуется в трехфазное напряжение с переменной частотой и амплитудой. Форма, частота и амплитуда выходного тока определяются алгоритмами устройства управления. Далее напряжение поступает на синусоидальный фильтр для преобразования выходного несинусоидального напряжения преобразователя частоты в выходное напряжение синусоидальной формы, затем напряжение поступает на повышающий трансформатор для получения высокого (6 кВ) напряжения.

Существенным недостатком рассмотренных высоковольтных электроприводов является их большая стоимость. Снижение стоимости достигается применением двухтрансформаторной схемы, в которой двойная трансформация напряжения осуществляется с помощью понижающего и повышающего высоковольтных трансформаторов, что позволяет использовать для регулирования частоты относительно дешевый низковольтный преобразователь. Такие двухтрансформаторные преобразователи отличаются относительной дешевизной и простотой практической реализации, поэтому они часто применяются для управления высоковольтными электродвигателями в диапазоне мощностей до 1,5 МВт.

Основными недостатками двухтрансформаторных преобразователей являются высокие массогабаритные характеристики, а также меньшие по сравнению с другими схемами КПД (93...96 %) и надежность. Эти преобразователи имеют ограниченный диапазон регулирования частоты вращения двигателя как сверху, так и снизу от номинального значения. При снижении частоты на выходе преобразователя увеличивается насыщение сердечника и нарушается расчетный режим работы выходного трансформатора, поэтому, как показывает практика, диапазон регулирования ограничен пределами  $n_{\text{ном}} > n > 0,5n_{\text{ном}}$ .

**Многоуровневые преобразователи частоты** отличаются от рассмотренных схем тем, что в них большое число последовательно вклю-

ченных вентилях в плече используется для формирования выходного напряжения с уменьшенными шагами по напряжению. Это обеспечивает лучшую форму кривой выходного напряжения, а также уменьшает броски напряжения, что улучшает режим работы нагрузки и снижает уровень электромагнитных помех, излучаемых преобразователем [4; 5].

Такие преобразователи частоты строятся по схеме автономного инвертора напряжения (АИН) на IGBT-транзисторах. Существует два класса схем многоуровневых преобразователей с привязкой средней точки через разделительные диоды и с плавающими конденсаторами.

Схема силовой части трехуровневого преобразователя с привязкой средней точки показана на рис. 2, а. Его работа поясняется рис. 2, б-в.

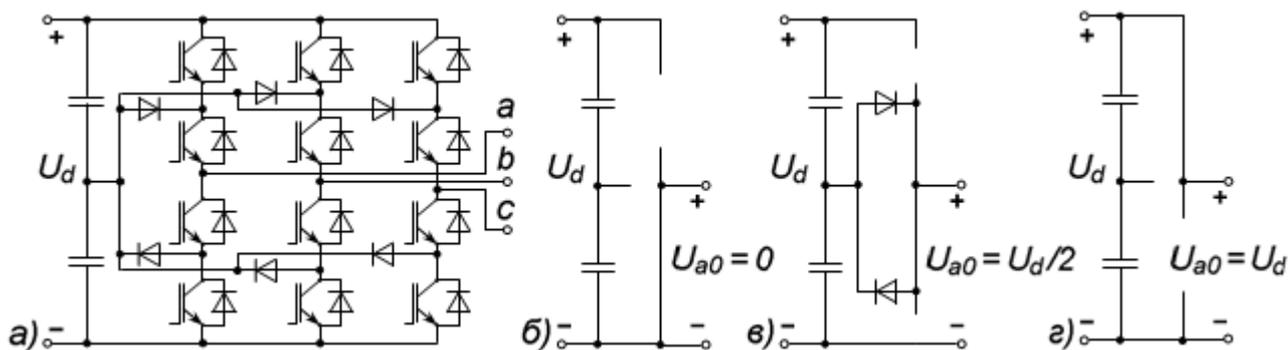


Рис. 2. Схема трехуровневого преобразователя с привязкой средней точки (а) и диаграммы состояний его одной фазы (б-в).

За счет последовательно соединенных конденсаторов на входе инверторного моста на средней точке этих конденсаторов формируется постоянное напряжение, равное  $U_d/2$ . Это напряжение через разделительные диоды подается на средние точки плеч инвертора, образованные последовательно включенными транзисторами. За счет соответствующего управления транзисторами инвертора на его выходе формируется напряжение трех уровней,  $U_d$ ,  $U_d/2$  и 0, в то время как классическая схема АИН формирует напряжение только двух уровней ( $U_d$  и 0). Кривая выходного напряжения одной фазы показана на рис. 3,а. За счет появления дополнительных ступеней в кривой выходного напряжения

существенно повышается коэффициент синусоидальности выходного напряжения, определяемый как отношение действующего значения первой гармоники выходного напряжения к действующему значению выходного напряжения  $v = U_{(1)}/U$ . Можно показать, что коэффициент синусоидальности приобретает максимальное значение при угле переключения  $\alpha = 39 \text{ эл. град.}$  частоты выходного напряжения, равное  $v = 0,974$ , в то время как для обычного (двухуровневого) АИН это значение составляет  $v = 0,900$ .

Схема силовой части преобразователя с четырьмя уровнями выходного напряжения и привязкой средней точки показана на рис. 4. В ней за счет последовательного включения на входе трех конденсаторов формируется два дополнительных уровня напряжения:  $\frac{2}{3}U_d$  и  $\frac{1}{3}U_d$ . За счет соответствующего управления транзисторами инвертора на его выходе формируется напряжение четырех уровней:  $U_d$ ,  $\frac{2}{3}U_d$ ,  $\frac{1}{3}U_d$ , и 0. Это дает дополнительное повышение коэффициента синусоидальности выходного напряжения, форма которого показана на рис. 3,б. При такой форме выходного напряжения коэффициент синусоидальности максимален при углах переключения  $\alpha_1 = 27 \text{ эл. град.}$  и  $\alpha_2 = 49 \text{ эл. град.}$  частоты выходного напряжения и составляет  $v = 0,9889$ . С увеличением числа ступеней коэффициент синусоидальности растет, стремясь к единице.

Схема трехуровневого преобразователя с плавающими конденсаторами показана на рис. 5, а, а возможные состояния для одной фазы такого преобразователя показаны на рис. 5, б-д. В основных состояниях, когда включен внешний транзистор, соединенный с отрицательным (рис. 5, б) или положительным (рис. 5, в) полюсом источника питания, конденсатор заряжается до напряжения  $U_d/2$  (то есть напряжение источника питания делится пополам между конденсатором и закрытым транзистором, соединенным с противоположным полюсом источника питания). В дополнительных состояниях напряжение конденсатора либо непосредственно подается на выход фазы (рис. 5, г), либо вычитается из

напряжения источника питания (рис. 5, д). В обоих случаях на выход фазы подается напряжение, равное  $U_d/2$ .

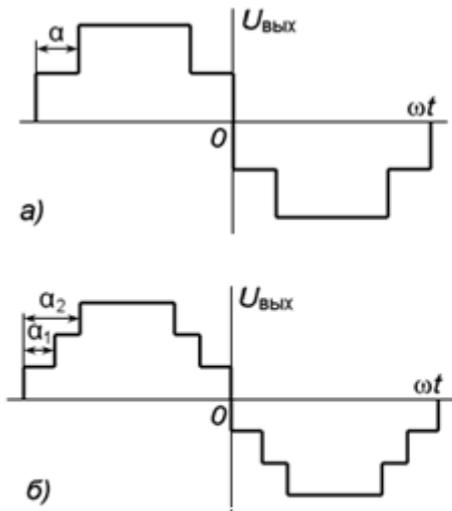


Рис. 3. Выходные напряжения преобразователей 3-уровневого (а) и 4-уровневого (б).

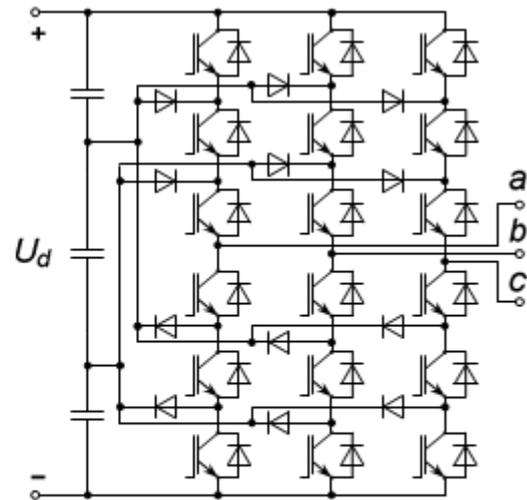


Рис. 4. Схема 4-уровневого преобразователя с привязкой средних точек.

Для подавления высших гармоник в преобразователях обоих типов используется многоуровневая широтно-импульсная модуляция. Законы модуляции весьма сложны и реализуются на базе микроконтроллеров. Они должны учитывать, в том числе, и изменение напряжения на конденсаторах при протекании через них тока нагрузки.

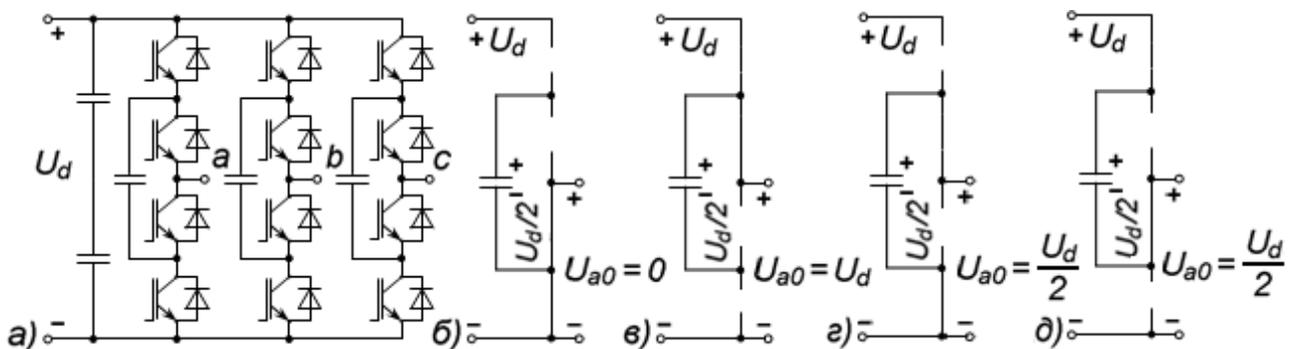


Рис. 5. Схема трехуровневого преобразователя с плавающими конденсаторами (а) и диаграммы состояний его одной фазы (б-д).

**Каскадные преобразователи** также обеспечивают многоуровневое формирование выходного напряжения. Они строятся на базе H-мостовых ячеек [4; 5]. В отличие от рассмотренных выше многоуровневых преобразователей каждая ячейка должна питаться от изолированного источника постоянного напряжения. Поэтому на входе каждой ячейки предусмотрен индивидуальный трехфазный мостовой выпрямитель, который, в свою очередь, питается от отдельной вторичной обмотки многообмоточного трансформатора. Схема H-мостовой ячейки показана на рис. 6, а. Выходы ячеек включаются последовательно, как показано на рис. 6, б. Поскольку каждая ячейка обеспечивает три уровня выходного напряжения:  $U_d$ , 0 и  $-U_d$ , при  $n$  последовательно включенных ячейках обеспечивается  $3 + 2(n - 1)$  уровней выходного напряжения преобразователя в целом. При трех ячейках в фазе возможно получение 7 уровней фазного напряжения, а при 5 ячейках – 11. Благодаря такой конфигурации суммарный коэффициент гармоник не превышает 3 %. Пример формирования выходного напряжения одной фазы преобразователя показан на рис. 7. На случай аварии одной из ячеек в каждой ячейке предусмотрен обходной контактор. При возникновении аварии он замыкает накоротко выход ячейки, исключая ее из последовательной цепи, а исправные ячейки могут продолжать работу.

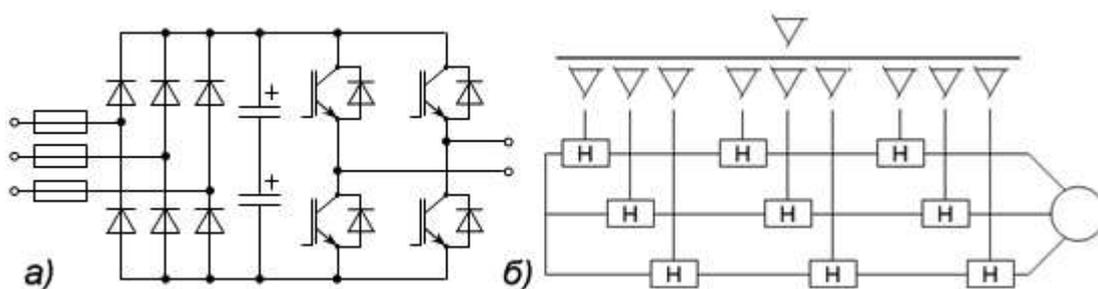


Рис. 6. H-мостовая ячейка (а) и преобразователь на основе H-мостовых ячеек (б).

В настоящее время высоковольтные каскадные преобразователи частоты на H-мостовых ячейках находят широкое применение в электроприводах переменного тока с частотным регулированием. Так, корпорация Mitsubishi Electric предлагает схему построения высоковольтного преобразователя частоты, которая в настоящее время является наиболее современной. Схема состоит из входного трансформатора, многоуровневого инвертора и системы управления. Входной трансформатор служит для преобразования трехфазного входного напряжения 6 кВ в 18-фазное выходное напряжение 578 В, которое после выпрямления питает ячейки инвертирования. Основной особенностью данного трансформатора является то, что его вторичные обмотки разделены на три группы по шесть обмоток в каждой. Фазовый сдвиг между соседними обмотками в группе составляет  $10^\circ$ , а между первой и шестой обмотками группы –  $50^\circ$ . Каждая выходная обмотка трансформатора нагружена на выпрямитель своей ячейки инвертирования.

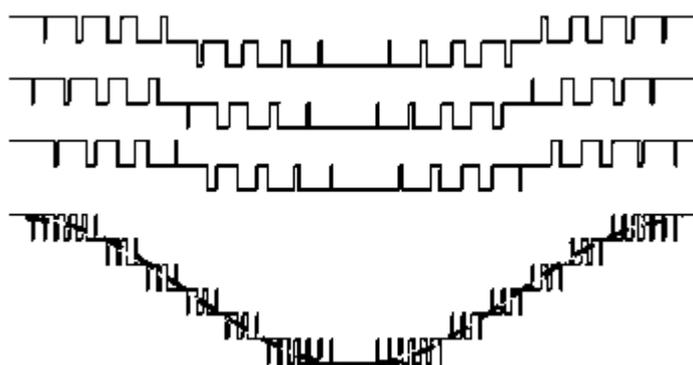


Рис. 7. Пример формирования выходного напряжения одной фазы H-преобразователя с тремя ячейками

По аналогичной схеме построены преобразователи частоты для электропривода, выпускаемые компаниями General Electric и Robicon [6]. Высоковольтные транзисторные преобразователи частоты предназначены для регулирования частоты вращения асинхронных и синхронных

электродвигателей с номинальным напряжением 3, 6 или 10 кВ мощностью до 5 МВт. Количество мостов в фазе зависит от напряжения питающей сети и класса напряжения применяемых транзисторных модулей. Согласующие трансформаторы производятся по специальной схеме с несколькими вторичными (гальванически не связанными) обмотками. Данная схема, при прочих равных условиях, позволяет существенно повысить качество потребляемого из сети тока и улучшить форму выходного напряжения инвертора. Благодаря этому в большинстве случаев преобразователи совмещаются с общепромышленными двигателями без установки специальных выходных фильтров. Система управления позволяет реализовать различные законы регулирования частоты выходного напряжения в широком диапазоне (0,1-100Гц) а также векторное управление.

Система частотного регулирования электродвигателей (см. рис. 8) состоит из интегрированного входного трансформатора, секции силовых ячеек и секции микроконтроллерного оборудования. На 6 и 6,6 кВ используются 15, 18 или 21 ячейка, соединенных последовательно по 5, 6 или 7 шт. в каждой фазе. На 10 и 11 кВ используются 24 или 27 ячеек, соединенных последовательно по 8 или 9 шт. в каждой фазе.

Благодаря использованию многообмоточного входного трансформатора и структуры силовой схемы с большим числом ячеек ток, потребляемый преобразователем частоты, имеет практически синусоидальную форму, что обеспечивает соответствие показателей качества сети требованиям ГОСТ 13109-97. При этом коэффициент мощности превышает 95 % во всем скоростном диапазоне без использования внешних конденсаторов для его повышения. Это также способствует стабилизации напряжения. Кроме того, не происходит перегрузки питающих линий, выключателей и трансформаторов по реактивной мощности. При работе с низкой скоростью приводы являются наиболее эффективными, потому что на всем скоростном диапазоне поддерживается

стабильно высокий коэффициент электрической мощности с использованием стандартных асинхронных двигателей.

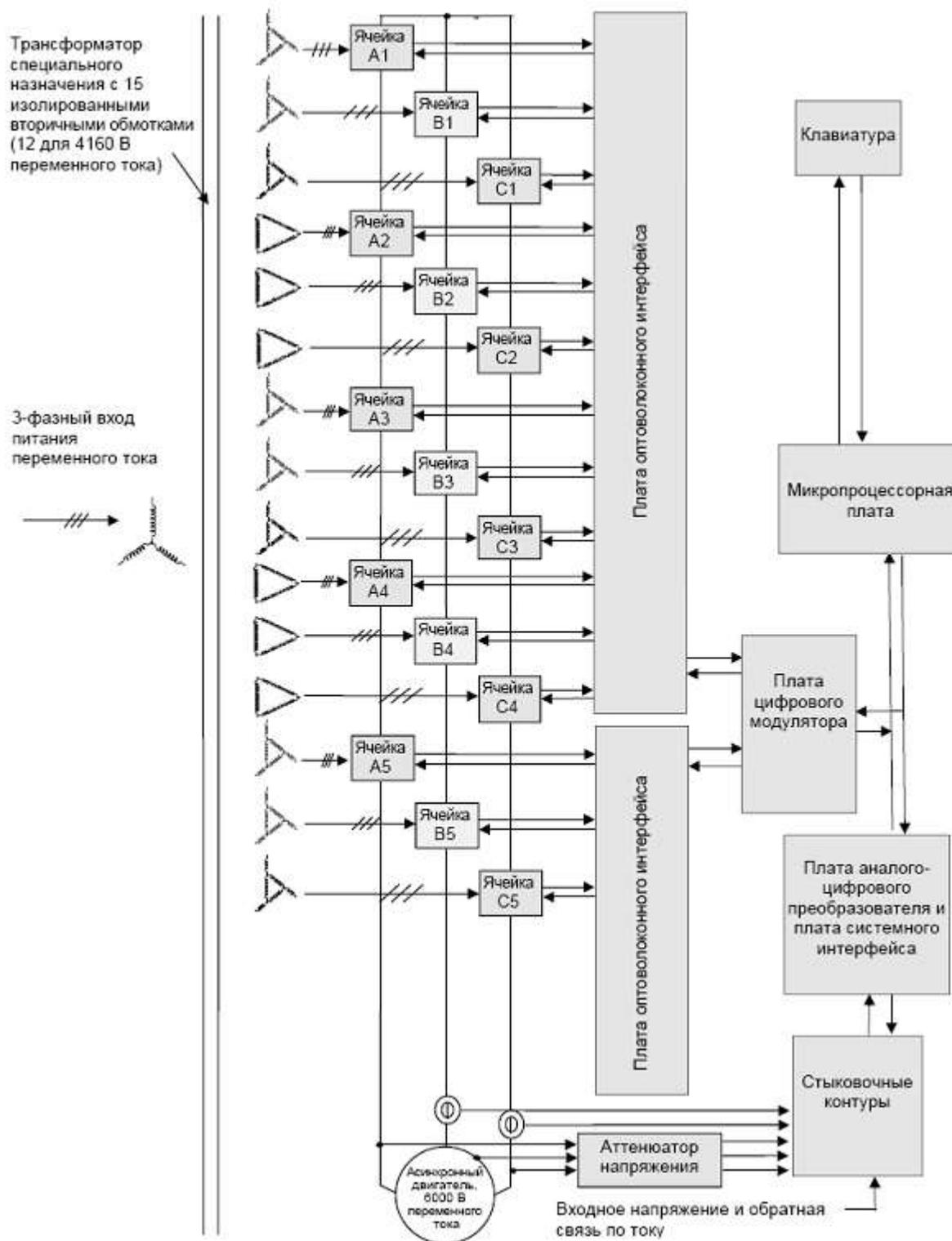


Рис. 8. Структурная схема системы частотного регулирования на основе каскадного ПЧ на N-ячейках

Функция обхода (bypass) обеспечивает автоматическое исключение из работы и обход неисправной ячейки за время 0,25 с при помощи шунтирующего контактора.

В заключение приведем основные преимущества каскадной многоуровневой системы:

- высокое качество выходного напряжения и тока; многоуровневая схема формирования выходного напряжения обеспечивает синусоидальную форму выходного тока при практически полном отсутствии высших гармоник;
- высокое качество потребляемого из сети тока и, соответственно, хорошая электромагнитная совместимость с системой электроснабжения; интегрированный силовой многообмоточный трансформатор в составе единого щита и новейшая схема построения преобразовательной части обеспечивают синусоидальность потребляемого тока и полное отсутствие влияния на питающую сеть высших гармоник;
- высокий коэффициент мощности и высокий КПД;
- повышенная надежность работы, так как даже в случае отказа нескольких силовых ячеек продолжится регулирование электродвигателя со снижением выходной мощности до планового ремонта преобразователя;
- отсутствие необходимости установки выходных фильтров электродвигателя для улучшения формы выходного тока;
- функции автоматического шунтирования (bypass) преобразователя частоты при срабатывании защит, вызывающих его отключение, и перевод электродвигателя на работу напрямую от сети;
- мощность от сотен кВт до десятков МВт;
- диапазон выходных напряжений от 2 кВ до 14,5 кВ;
- выходная частота до 250 Гц;
- разрешающая способность по частоте 0,1 Гц.

## Список использованных источников

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.
2. Преобразователь частоты синхронный высоковольтный серии ПЧСВ. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.technoros.spb.ru/vvpc-pcsv.html> (дата обращения 27.07.2015).
3. Преобразователи частоты тиристорные серии ПЧИТ: Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.technoros.spb.ru/vvpc-pcit.html> (дата обращения 27.07.2015).
4. Power electronics handbook / ed. by M.H. Rashid. San Diego: Academic Press, 2001. 895 p.
5. The power electronics handbook / ed. by T.L. Skvarenina. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002. 664 p.
6. Medium-Voltage Liquid-Cooled Drives Catalog D 15.1, 2012 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/medium-voltage-drives/Documents/DRV-MV-liquid-cooled-catalog.pdf> (дата обращения 27.07.2015).