

Повышение эффективности использования энергии

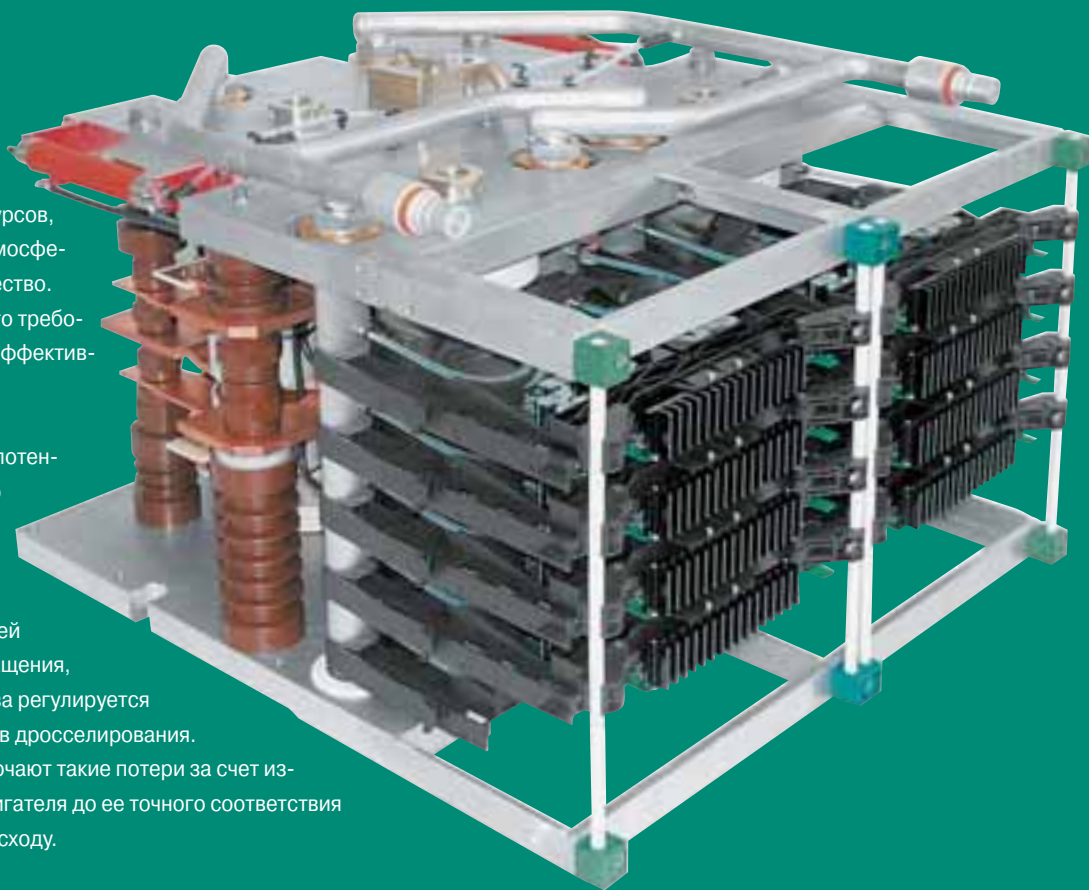
Пятиуровневые преобразователи частоты для средних напряжений
Педер Йорг, Геральд Шейер, Пер Викстрём

Истощение энергетических ресурсов, и выброс парниковых газов в атмосферу все больше волнуют человечество. Компания АББ откликается на это требование, содействуя повышению эффективности использования энергии.

Одна из областей с громадным потенциалом энергосбережения – это электродвигатели, которые приводят в действие вентиляторы, насосы и компрессоры. Они часто работают от двигателей с фиксированной скоростью вращения, причем расход жидкости или газа регулируется с помощью энергоемких методов дросселирования. Преобразователи частоты исключают такие потери за счет изменения скорости вращения двигателя до ее точного соответствия необходимому давлению или расходу.

Итак, проблема решена? Не совсем. При разработке преобразователей частоты среднего напряжения есть две основные проблемы, которые нужно решить: это достижение необходимого напряжения двигателя и получение формы напряжения, наиболее близкой к идеальной синусоиде. Новаторство компании АББ состоит в новом сочетании уже существующих решений обеих указанных проблем.

Термин «пятиуровневая схема» означает, что в ней имеется пять выходных уровней вместо обычных двух или трех. Такой подход дает значительное улучшение формы сигнала, одновременно обеспечивая достижение более высокого выходного напряжения. И для того чтобы закрепить этот успех, была реализована техническая новинка, где для снижения риска и повышения надежности максимально используются проверенные концепции.



Традиционные методы регулирования расхода обычно основаны на энергосемке дросселировании. Если воспользоваться простой аналогией, то это похоже на управление автомобилем, когда на педали газа лежит кирпич (нерегулируемый источник питания), а для управления скоростью используется педаль тормоза (дроссель на основе трения). Преобразователи частоты аналогичны регулируемым педалям газа в управлении двигателем и представляют громадный потенциал для экономии энергии.

Электродвигатели потребляют около 30% всей электрической энергии, вырабатываемой в мире. Примерно три четверти всех двигателей приводят в действие насосы, вентиляторы или компрессоры, используемые в приложениях, где потребление энергии может быть снижено с помощью управления скоростью вращения. Оценка компании АББ показывает, что внедрение таких преобразователей частоты в приводах среднего напряжения по всему миру может дать экономию 227 ТВтч, что соответствует мощности 144 электростанций, работающих на ископаемом топливе, или совокупному потреблению энергии такой страны, как Испания¹⁾.

В настоящее время менее 10% всех электродвигателей, продаваемых ежегодно, оснащено наиболее эффективным средством управления скоростью: преобразователем частоты. Хотя, кроме того, он требует наименьшего технического обслуживания из всех имеющихся средств управления двигателями, потребители в большинстве случаев все еще делают свой выбор в пользу других средств управления. Почему? Наиболее часто отмечают следующие преграды для внедрения этой технологии:

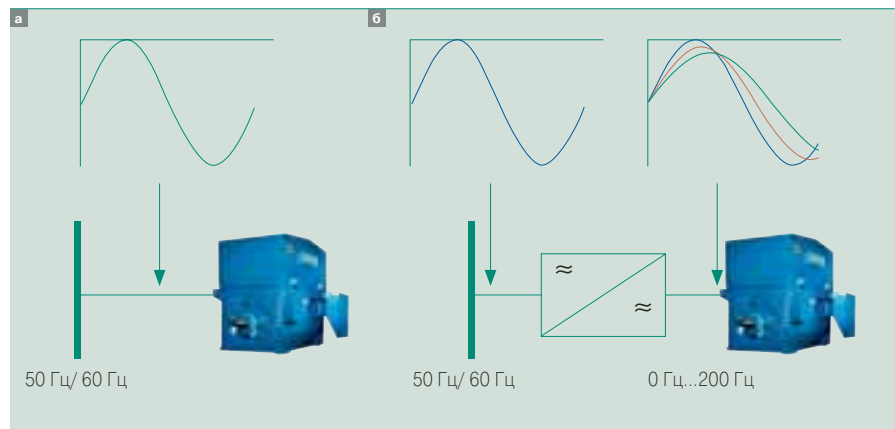
- надежность,
- гармоники,
- цена и/или требование краткосрочной окупаемости.

Новаторские пятиуровневые преобразователи компании АББ решают все эти проблемы.

Улучшение формы сигнала и повышение напряжения

На выходе традиционного синхронного электрического генератора напряжение имеет синусоидальную форму. Электрические двигатели, которые подсоединены непосредственно к промышленной энергетической сети (схема прямого пуска) и, следовательно, работают с фиксированной скоростью, оптимизированы для формы сигнала этого типа. Если двигатель такого же исполнения должен работать с переменной

1 Электродвигатель с прямым пуском (а) и с преобразователем частоты (б)



скоростью, то преобразователь частоты должен обеспечивать форму сигнала, настолько близкую к идеальной синусоидальной форме, насколько это необходимо. Отклонения от идеальной формы сигнала приводят к дополнительному нагреву двигателя. В свою очередь это означает, что такой электродвигатель нельзя использовать на полную мощность, и его номинальную рабочую мощность следует снизить. Еще одно негативное следствие состоит в том, что привнесенные пульсации момента вращения могут вызвать крутильные колебания в приводимом в движение механизме.

Электродвигатели потребляют порядка 30% всей электрической энергии, вырабатываемой в мире. Примерно три четверти всех двигателей приводят в действие насосы, вентиляторы или компрессоры, используемые в приложениях, где потребление энергии может быть снижено с помощью управления скоростью вращения.

К тому же номинальные напряжения электродвигателей имеют стандартные значения. Для электродвигателей среднего напряжения, рассчитанных на мощность порядка 7000 кВт, наиболее часто встречающимися номиналами являются 6 кВ (частота 50 Гц) и 4 кВ (частота 60 Гц). Это значит, что для того, чтобы пользоваться одной и той же номенклатурой двигателей и при прямом пуске (рис. 1а), и с преобразователями частоты (рис. 1б), выходной сигнал таких преобразователей

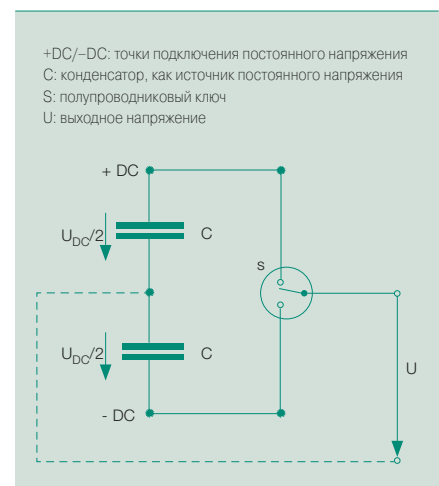
частоты должен быть способен достичь подобных значений напряжения.

Получить такие выходные напряжения с традиционными двух- и трехуровневыми преобразователями нелегко, поскольку максимальное выходное напряжение определяется номинальным напряжением силовых полупроводниковых приборов.

Схема преобразователя частоты

Преобразование энергии в таком преобразователе осуществляется в два этапа: на первом из них поступающее от источника синусоидальное напряжение фиксированной частоты и постоянной амплитуды выпрямляется, преобразуясь в постоянное напряжение. Затем, на втором этапе, это постоянное напряжение «инвертируется» в переменное, частоту и амплитуду которого можно регулировать. И каскад выпрямителя, и каскад инвертора в этом преобразователе реализуются с помощью электронных схем, построенных на полупроводниковых ключах. Эта статья посвя-

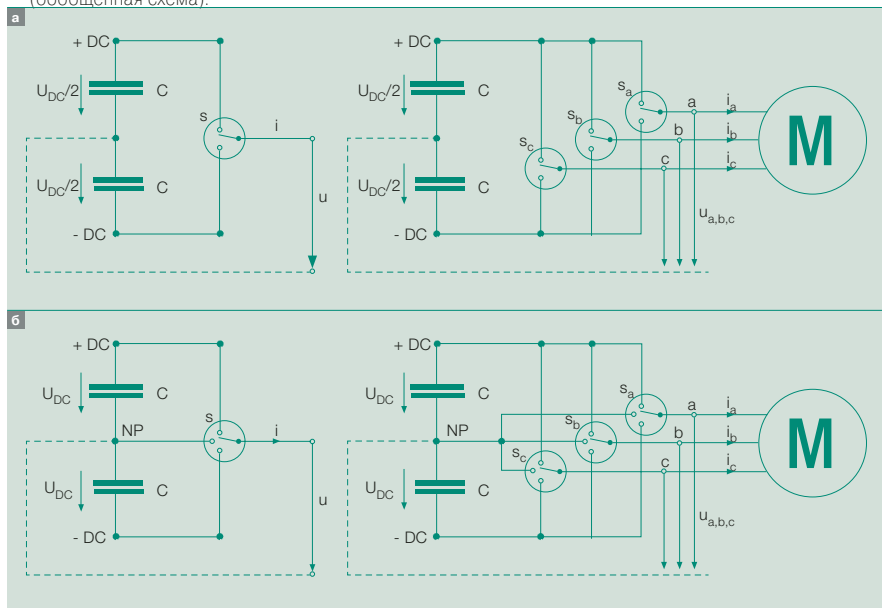
2 Схема одной фазы двухуровневого инвертора напряжения с идеальным ключом, питающимся от источника постоянного напряжения.



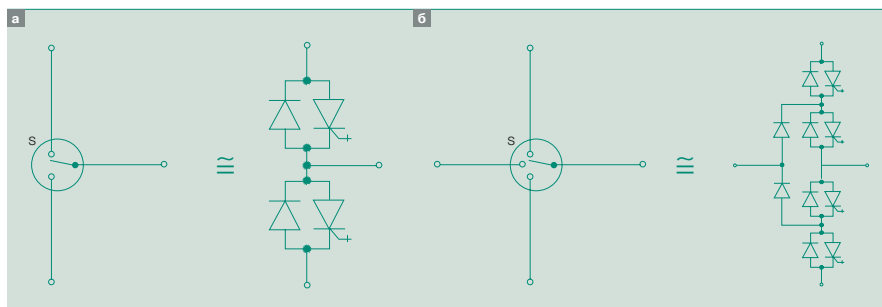
¹⁾ См. также П. Викстрём, Ю. Толвананен, А. Саволайнен, П. Барбоза, Эффективный привод, как средство экономии энергии, АББ Ревю 2/2007, с. 73–80.

Инновации в изделиях

3 Двухуровневый инвертор с отдельными конденсаторами (а) и трехуровневый инвертор (б) (обобщенная схема).



4 Хотя ключи в преобразователях часто показывают на схемах просто в виде контактов (слева), фактически они представляют собой большое число полупроводниковых компонентов (справа): (а) двухуровневое плечо одной фазы и (б) его трехуровневый эквивалент



Полупроводниковые приборы: 50 лет развития ключей

За последние 50 лет компания АББ заняла и удерживала лидирующую позицию в области силовых электронных приборов. Преобразователи частоты для электродвигателей – существенная часть этого бизнеса.

Полупроводниковые ключи – сердце каждого преобразователя частоты. Историю появления пятиуровневых ключей лучше всего представить с помощью краткого экскурса по эволюции этих приборов.

Читатели, которые достаточно долго следят за развитием этих приборов, помнят, что первые электрические приводы высокой мощности были основаны на тиристорах, коммутирующих сетевое напряжение. Эти тиристоры рассчитаны на большие токи и высокие обратные напряжения (у современных тиристоров они достигают 8–10 кВ). Их главный недостаток состоит в том, что их можно включить в любой заданной точке, но невозможно выключить

(они остаются во включенном состоянии, пока внешнее воздействие не приведет к прекращению протекания тока). Эта особенность ограничивает возможные стратегии коммутации и, как следствие, удобство таких схем с точки зрения качества питания (см. двухуровневую коммутацию на рис. 7а).

Преобразователи, где используются такие ключи, создают гармоники с высокой амплитудой и относительно низкой частотой. Такие гармоники вызывают проблемы как на стороне источника питания, так и на стороне электродвигателя. Более того, коэффициент мощности на стороне сети меняется в рабочем диапазоне преобразователя частоты. Проблемы на стороне сети были решены за счет применения фильтров. С проблемами на стороне двигателя справились путем задания таких размеров двигателя, чтобы он выдерживал дополнительный нагрев и чтобы сконструировать его вал и обмотки в соответствии с требованиями,

в первую очередь, технологии построения указанного второго каскада, инвертора.

Большинство преобразователей компании АББ являются так называемыми инверторами напряжения. На рис. 2 показана простейшая схема такого инвертора: единственная выходная фаза инвертора попеременно подключается к одному или другому выводу большого конденсатора, служащего источником постоянного напряжения. Задача выпрямительной схемы (не показана) – обеспечивать, чтобы этот конденсатор оставался заряженным до определенного постоянного напряжения. Если должно генерироваться переменное напряжение, то необходимо, чтобы ключ в схеме инвертора изменял свое положение (то есть изменял выходное напряжение) один раз за каждую половину периода. Если, например, требуется выходная частота 50 Гц, то ключ должен устанавливаться в каждое из двух своих положений 50 раз в секунду.

На практике этот ключ переключается намного быстрее. Для управления его коммутационным состоянием используется цифровой контроллер. Коммутационная стратегия этого контроллера определяет не только частоту, но и среднее напряжение на нагрузке. Эти уровни по желанию модифицируются путем настройки входных параметров этого узла. Такая стратегия управления известна как широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

В действительности этот ключ не является подвижным контактом, как показано на схеме, а построен на силовых полупроводниковых приборах (рис. 4а). Развитие и возможности таких ключей,

налагаемыми опасностью крутильных колебаний. На тот момент это считалось приемлемым, потому что не существовало другого решения, способного решить такую задачу. Фактически это все еще предпочтительное решение для очень мощных приложений (20 МВт и выше), благодаря его надежности. Однако с появлением новых коммутационных компонентов могут быть реализованы новые схемы, которые обеспечивают форму напряжения, намного более близкую к идеальной синусоидальной форме. Новые компоненты характерны тем, что их можно выключить в произвольный момент времени. Таким свойством обладают, например, биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и запираемые тиристоры с интегрированным блоком управления (IGCT).

начиная с первого появления этих преобразователей, зависели от прогресса в области силовых полупроводниковых приборов (вставка 1).

Переход на следующий уровень

Хотя сигнал двухуровневого инвертора напряжения, как показано на рис. 7а, можно изменять по амплитуде и частоте с помощью ШИМ, его форма на выходе далека от синусоидальной. В результате будут высокими нелинейные искажения тока, а поэтому – дополнительные потери и тепловыделение в двигателе. Один из способов улучшить форму напряжения – ввести большее число уровней напряжения. Если воспользоваться еще одной простой аналогией, то это подобно повышению разрешающей способности компьютерного монитора, для того чтобы сделать графику четче.

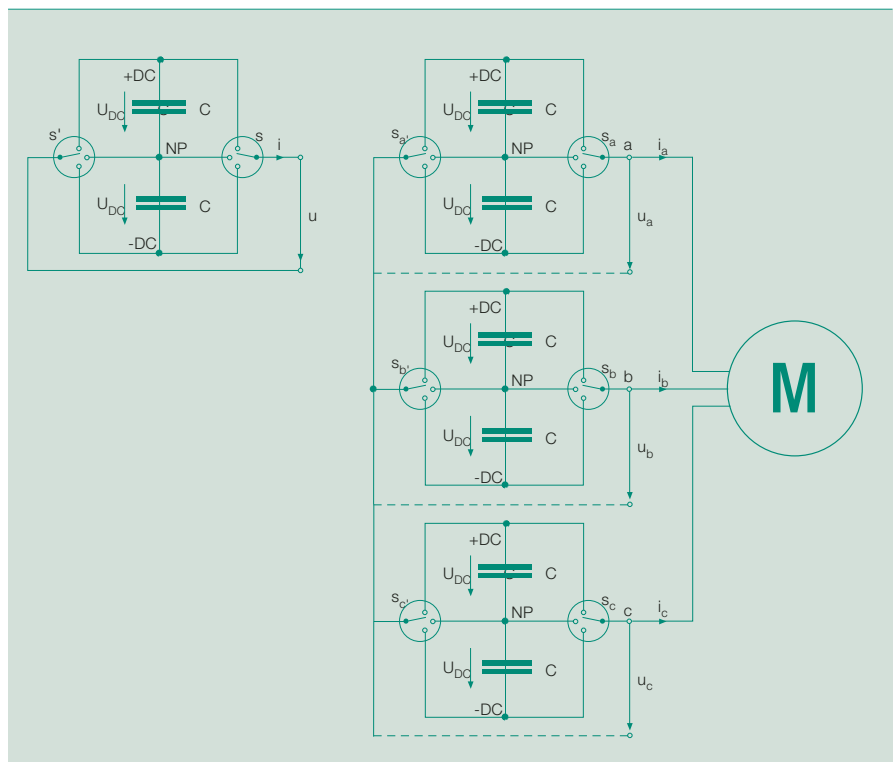
В преобразователе ACS 5000 компании АББ используется пятиуровневая технология.

Еще одной причиной тенденции отхода от двухуровневой схемы является то, что максимальное выходное напряжение, достижимое с двухуровневой схемой инвертора напряжения и современными силовыми полупроводниковыми приборами, составляет 2,3 кВ. Этого недостаточно для стандартной номенклатуры электродвигателей среднего напряжения.

Схема с двумя конденсаторами и электронным трехпозиционным ключом, которую также называют трехуровневым инвертором – по числу комбинаций выходных напряжений на фазу, – была уже известна. На рис. 3б показана концепция этой

схемы с трехпозиционным ключом. Эта схема должна подключать каждую из трех точек соединения конденсаторов к выходу для обоих направлений тока²⁾. Для конкретных номинальных токов и напряжений компания АББ стандартизировала

5 Общая схема одной фазы нового усовершенствованного пятиуровневого инвертора (слева) и полная схема привода трехфазного электродвигателя с девятиуровневым линейным напряжением (справа)



6 В преобразователе ACS 5000 компании АББ используется пятиуровневая технология, обеспечивающая девятиуровневое линейное напряжение на двигателе



Инновации в изделиях

этот электронный трехпозиционный ключ (рис. 46), как силовой электронный стандартный блок (Power Electronic Building Block, PEVB). Эта стандартизация дает преимущество, заключающееся в том, что одинаковые блоки используются в разных приложениях, позволяя компании АББ намного быстрее накапливать опыт практической эксплуатации, а следовательно, быстрее дорабатывать схему, обеспечивая для потребителя повышение надежности.

Увеличение числа уровней радикально улучшает форму сигнала.

В течение примерно десяти лет стандартные блоки PEVB использовались для разных изделий и систем, включая преобразователи регулируемых приводов (то есть в приводах ACS 1000 и ACS 6000), системы аккумулирования энергии и системы кондиционирования электроэнергии.

Эволюция пятиуровневых схем

В академических кругах какое-то время обсуждались комбинации большего числа конденсаторов и более сложных электронных схем. Однако, как правило, зарядно-разрядные характеристики имеющихся конденсаторов и свойства серийно выпускаемых полупроводниковых ключей не отвечали требованиям этих предложений. К тому же такие решения почти не давали возможности использовать существующие стандартные блоки, а показатели их надежности были сомнительны из-за большого числа компонентов.

Для последнего добавления к своему семейству приводов среднего напряжения ACS 5000, инженеры компании АББ вновь обратились к традиционным изделиям на основе тиристоров, таких как понижающие преобразователи частоты, и – имея в виду существующий трехуровневый

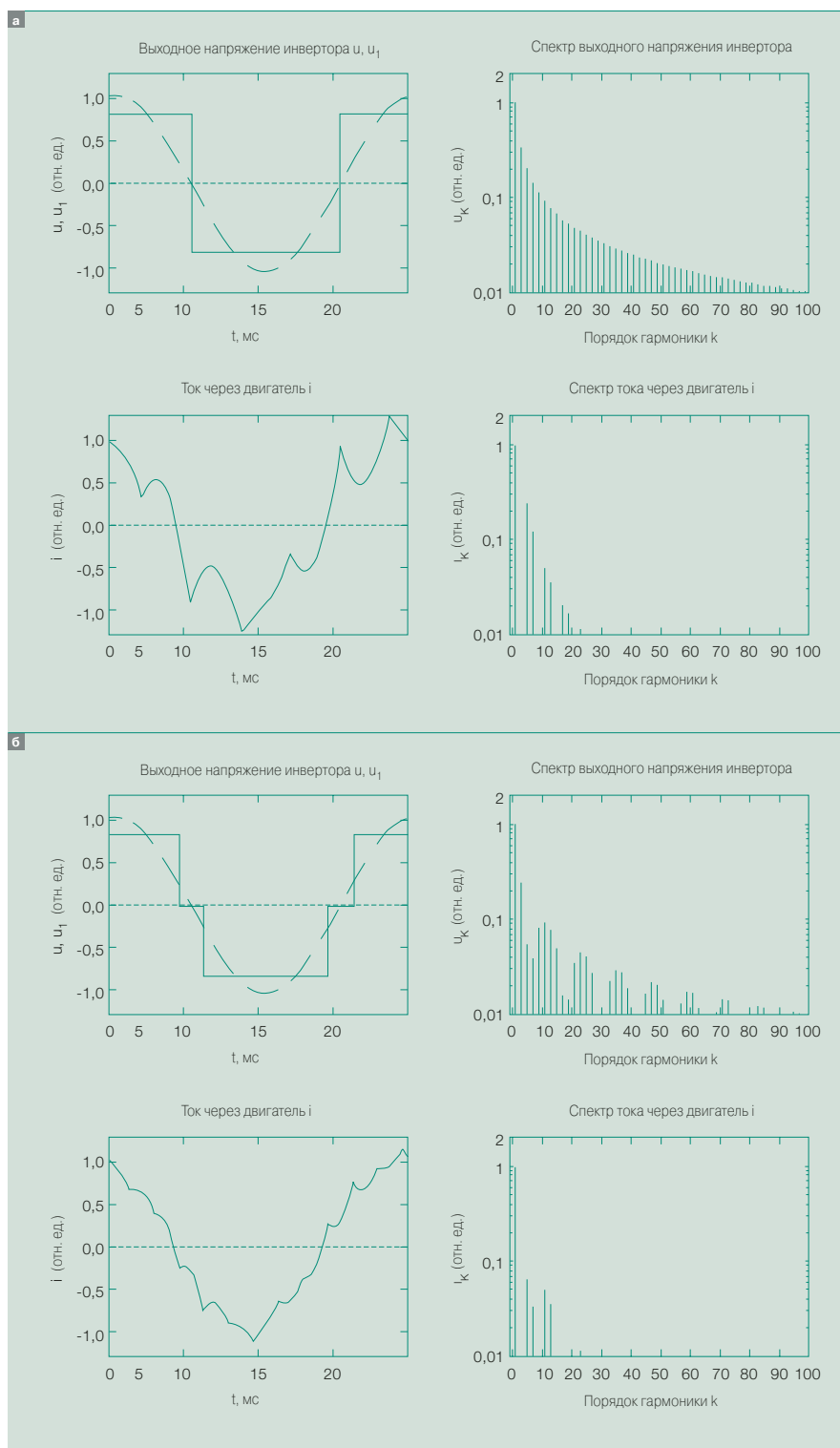
Номенклатура приводов компании АББ

Компания АББ, будучи ведущим поставщиком приводов, предлагает полную номенклатуру регулируемых приводов для двигателей в диапазоне от 0,12 кВт до мощности свыше 100 МВт.

Наша компания предоставляет услуги энерго-снабжающим и производственным предприятиям в цементной, горно-добывающей, химической, нефтегазовой, морской, металлургической и целлюлозно-бумажной отраслях.

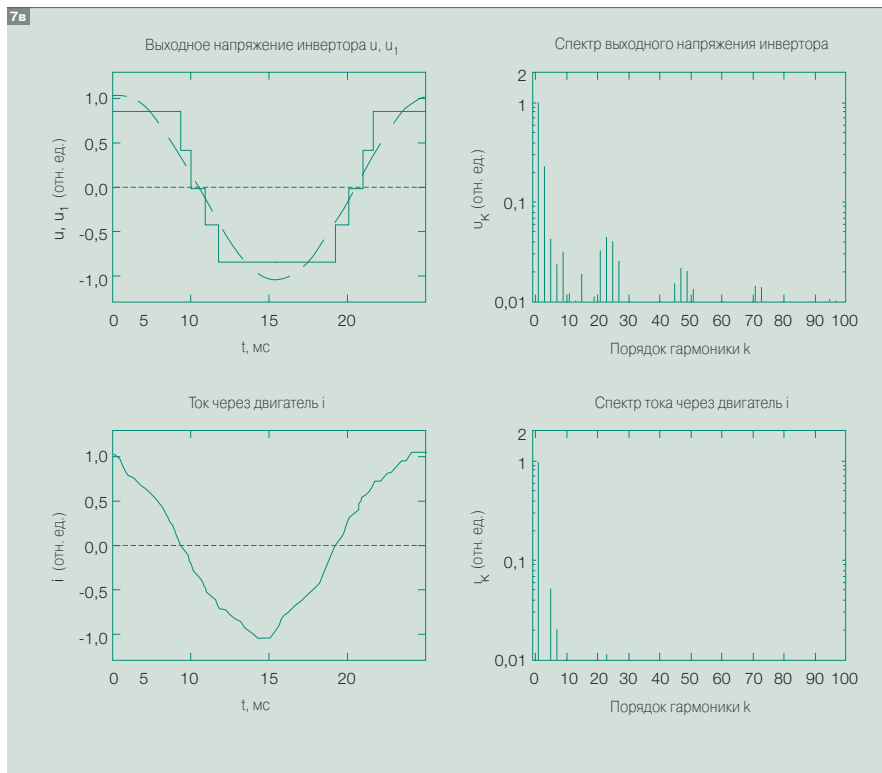
Для получения более подробной информации посетите сайт www.abb.com/drives

7 Повышение числа уровней с двух (а), через три (б), до пяти (в) радикально улучшает форму сигнала, даже при минимальной частоте переключения, как показано на рисунке



стандартный блок (рис. 46) – предложили удивительно простое решение для изделия с пятью уровнями выходного напряжения и, соответственно, девятью междуфазными (линейными) уровнями (рис. 8). Это было достигнуто за счет

применения проверенной трехуровневой технологии по отношению к нейтральной точке звезды электрической системы, независимо для каждой фазы.



Общая схема (рис. 5) взята из существующих идентичных стандартных блоков S и S', соответственно.

Проверенная технология трехуровневого инвертора вновь использована в новаторской схеме.

Почему пять уровней?

Форма линейного напряжения двухуровневого и трехуровневого инвертора сравнивалась с формой линейного напряжения пятиуровневого инвертора (рис. 7в). Пятиуровневый инвертор, применяемый в приводе ASC 5000 (рис. 6), обеспечивает электродвигатель девятиуровневым линейным напряжением (рис. 8). Достаточно только взглянуть на форму этого сигнала, и сразу становится ясно, что новый пятиуровневый инвертор формирует выходное напряжение, которое намного ближе к идеальной синусоиде. Действительно, этот результат настолько убедителен, что теперь можно использовать электродвигатели, предназначенные для прямого пуска, без необходимости снижения их номинального рабочего напряжения. На сегодняшний день это дает оптимальное решение для преобразователя на 6кВ.

Будет ли дальнейшее улучшение формы сигнала достигаться за счет увеличения числа уровней? Такие попытки должны были бы привести к существенному усложнению, не давая пропорционального выигрыша. В частности, надежность привода ухудшилась бы из-за большего количества компонентов.

Проверенные решения

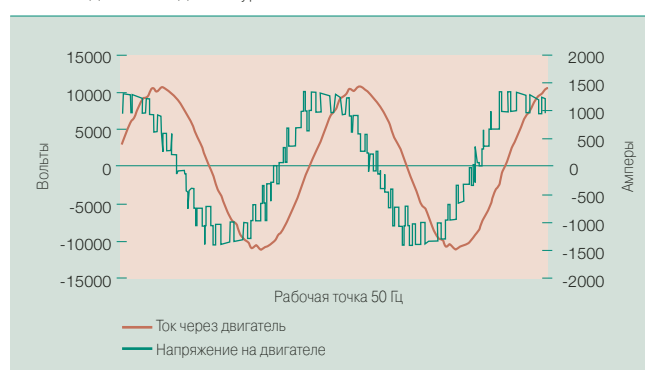
Компания АББ нашла удивительно простой способ получения формы напряжения, близкой к синусоидальной, с преобразователем частоты, во многом основанном на проверенных существующих компонентах. Отработанная технология трехуровневого инвертора вновь использована в новаторской схеме, обеспечивая пять уровней напряжения на фазу или даже девять уровней для линейного напряжения. Полное повторное

Пятиуровневый силовой электронный стандартный блок легко вдвигается в привод по направляющим.



использование основных силовых электронных стандартных блоков позволяет достичь прекрасной формы выходного сигнала при доказанной надежности. Достигнута цель – использовать стандартные электродвигатели, одновременно поддерживая высокую эффективность использования энергии с малым числом элементов.

8 С помощью пятиуровневого преобразователя выходное линейное напряжение достигает девяти уровней.



Педер Йорг
Геральд Шейер
Пер Вилкстрём
 ABB Switzerland Ltd.
 Турги, Швейцария
 pieder.joerg@ch.abb.com
 gerald.scheuer@ch.abb.com
 per.wilkstroem@ch.abb.com

2) Наиболее мощные полупроводниковые приборы способны проводить ток только в одном направлении.