

ТЕХНИЧЕСКАЯ БРОШЮРА

# Приводы со сверхнизким уровнем гармоник и рекуперативные приводы

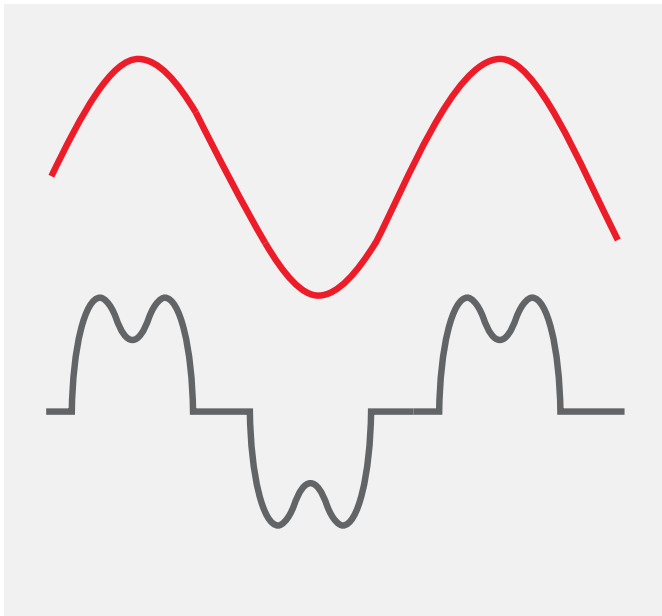
Повышение эффективности и надежности процессов и систем



# Что такое гармоники

## и какое воздействие они оказывают?

Бесперебойная работа электрического оборудования зависит от качества получаемого электропитания — оно должно быть чистым, без помех. Вместе с тем постоянные и переходные электромагнитные помехи — распространенное явление в сетях энергоснабжения, которое возникает по разным причинам. Наиболее часто встречаются постоянные помехи: они присутствуют практически в каждой электросети. Такие гармонические искажения могут значительно влиять не только на рабочие параметры сети, но и на ее надежность.



—  
В идеальном случае электроснабжение имеет ровную синусоидальную форму волны (верхняя линия). Однако на практике она часто искажается нежелательными гармониками (нижняя линия).

Гармоники оказывают негативное воздействие на сети энергоснабжения и подключенное оборудование. Чем выше содержание гармоник, тем выше сетевой ток, что приводит к увеличению потерь как в сети в целом, так в отдельных ее компонентах: трансформаторах, переключателях, автоматических выключателях и кабелях. Одно из последствий повышенного сетевого тока — перегрев оборудования электросети, что вызывает его преждевременный выход из строя. Поскольку ток с гармониками является искаженным, то существует риск неправильного функционирования и поломки подключенных устройств.

Гармонические искажения (или гармоники) представляют собой электромагнитные загрязнения электросети, изменяющие чисто синусоидальную форму волны тока и напряжения, генерируемую источником электроснабжения. Гармоники обусловлены потреблением тока нелинейными нагрузками, работающих по принципу непрерывного переключения элементов силовой электроники. Примерами нелинейных нагрузок могут быть светодиодные осветительные приборы, источники бесперебойного питания, компьютеры и частотно-регулируемые приводы (ЧРП).

Содержание гармоник измеряется с помощью суммарного коэффициента гармонических искажений (THD). Это процентная величина, равная отношению между всеми гармоническими искажениями тока или напряжения и током или напряжением основной гармоники. В случае отсутствия гармоник напряжения или тока значение THD составляет 0 %.<sup>1</sup>

Проблемы, возникающие под влиянием гармоник, могут проявиться не сразу: нарушения в работе могут произойти через какое-то время или только при включении определенных комбинаций оборудования. Зачастую операторы объектов даже не связывают возникающие проблемы с гармониками. При этом необходимо понимать, что объектам ответственного назначения, например центрам обработки данных, гармоники могут нанести значительный финансовый и репутационный ущерб, а в случае больничных учреждений — ставить под угрозу жизнь людей. Поэтому крайне важно выбирать оборудование, не оказывающее негативного воздействия на систему энергоснабжения и подключенные устройства. Это позволяет обеспечить более высокую надежность и эффективность процессов.

В новых проектах учет влияния гармоник помогает точнее определить оптимальную мощность электрического оборудования и в результате улучшить экологичность проекта.

# Преобразователи частоты и важность их характеристик, с точки зрения гармонических искажений

Преобразователи частоты позволяют экономить огромное количество энергии при работе с переменной нагрузкой. Это возможно благодаря управлению частотой вращения электродвигателя в точном соответствии с потребностями технологического процесса. При этом следует учитывать их потенциальное влияние на сеть энергоснабжения и подключенное оборудование.

## Роль преобразователей частоты в промышленности

Считается, что на системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) приходится около 50 % энергии, потребляемой типичным зданием коммерческого назначения.<sup>2</sup> Количество людей в таких зданиях зависит от времени суток, и соответственно меняется нагрузка на HVAC-системы. Опираясь на свой обширный опыт, компания ABB разработала приводы, способные повысить энергоэффективность HVAC-систем на 20–60 %, сократить углеродный след и обеспечить существенную экономичность эксплуатации зданий.

Еще одним показательным примером являются молочные производства, на которых до 40 % энергии используются для целей технологического охлаждения и заморозки, еще 40 % идут на нужды автоматизированного

производства, а остальные 10 % — для отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.<sup>3</sup> Во всех этих процессах происходят колебания нагрузки, и поэтому применение преобразователей частоты имеет огромный потенциал в плане энергосбережения.

В то же время, как и в случае с другими нелинейными нагрузками, важно помнить, что приводы генерируют гармоники в линии электропитания, которые, как уже говорилось, при превышении определенного порога могут отрицательно влиять на сеть и подключенное оборудование. По этой причине уровень гармоник, генерируемых преобразователями частоты, необходимо учитывать на стадии проектирования, чтобы оценить воздействие гармоник и его последствия для объекта.

## Использование электроэнергии в различных технологических процессах в производстве молока и молочной продукции



### Влияние преобразователей частоты на эффективность сети энергоснабжения

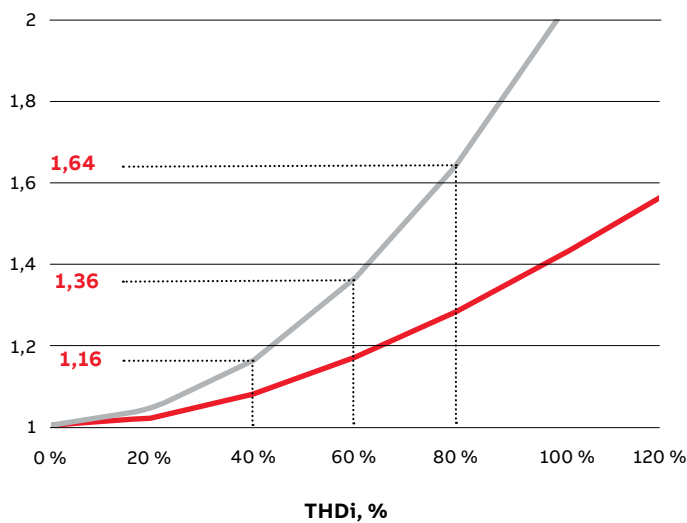
Действительно, используя преобразователи частоты, можно снизить энергопотребление техпроцессов, но при этом нужно обязательно принимать во внимание воздействие приводов на эффективность сети энергоснабжения, к которой они подключены. Согласно теории, ток, проходя через проводник, вызывает его нагрев, что приводит к потерям энергии (так называемые джоулевы потери):

$$P = I^2 \cdot R$$

где  $P$  — тепловые потери,  $R$  — сопротивление проводника,  $I$  — ток сети. Полный ток, содержащий гармоники и называемый среднеквадратичным током  $I_{rms}$ , больше тока основной гармоники  $I_1$  и описывается уравнением:

$$I_{rms} = I_1 \cdot \sqrt{1 + THDi^2}$$

С помощью приведенных выше формул можно рассчитать, во сколько раз содержание гармоник увеличивает потери тока сети. Пример: Потери тока  $I_{rms}$  при  $THDi$  (суммарном коэффициенте гармонических искажений тока) на уровне 40 % увеличиваются в 1,16 раза по сравнению с системой без гармонических искажений. Из-за этого работа сети становится менее эффективной и повышается энергопотребление технологического оборудования.



**I<sub>rms</sub>** — Потери энергии

—  
Зависимость полного линейного тока  $I_{rms}$  и относительных потерь энергии от содержания гармонических искажений ( $THDi$ ).

### Влияние преобразователей частоты на стоимость проекта

В дополнение к вышесказанному, увеличенный ток сети также требует установки оборудования системы питания большей мощности, способного выдерживать избыточный ток. Из-за увеличения размера компонентов растет расход материалов и, как следствие, ухудшается экологичность оборудования.

При низком содержании гармоник кабели увеличенного сечения не требуются. При высоком  $THDi$  кабели должны иметь увеличенное сечение по причине повышенного тока сети. Это предотвращает перегрев кабеля и повреждение изоляции, которые могут привести к пожару. Существуют определенные рекомендации по выбору кабелей с учетом  $THDi$  в сети. Таким образом, при  $THDi$  ниже 10 % какое-либо дополнительное увеличение сечения кабелей не требуется, при  $THDi$  40 % (типичное значение для стандартных 6-пульсных приводов со встроенным дросселем) сечение должно быть увеличено примерно на 10 %, а при  $THDi$  70 % — более чем на 20 %.

Еще один значимый фактор увеличения мощности — это трансформатор, который зачастую является одним из самых дорогих компонентов в сети энергоснабжения проекта. Если нелинейная нагрузка (например, привод) получает питание от трансформатора, необходимо снизить мощность трансформатора, чтобы избежать перегрева и связанного с ним отказа. В случае  $THDi$  ниже 10 % рекомендуется увеличить мощность трансформаторного оборудования приблизительно на 10 %, тогда как при  $THDi$  около 40 % мощность трансформатора следует увеличить примерно на 40 %.

Для определения способности трансформатора выдерживать различные степени нелинейности тока нагрузки без превышения номинального повышения температуры лабораторией Underwriter Laboratories был выведен коэффициент  $K$ .<sup>4</sup> Коэффициент  $K$  принимает значения от 1 до 50. Коэффициент  $K$ , равный 50, обозначает наиболее тяжелые условия гармонических искажений из возможных. Стандартные трансформаторы имеют коэффициент  $K$ , равный 1,0, и предназначены только для работы с линейными нагрузками, которые не генерируют гармонические искажения. На графике типичного снижения номинальных параметров трансформатора можно увидеть, как различные типы нагрузок влияют на мощность трансформатора, а также какое снижение номинальных параметров трансформатора требуется при значениях  $THDi$ , которые типичны для стандартных преобразователей частоты.

### Снижение номинальных параметров стандартного трансформатора



**Коэффициент К различных нагрузок**

Нагрузка	Коэффициент К
Электродвигатели, лампы накаливания, электрическое отопление, электродвигатели-генераторы (без полупроводниковых приводов)	К-1
Системы освещения с разрядными лампами высокой интенсивности, индукционные нагреватели, сварочные аппараты, ИБП с дополнительной входной фильтрацией, ПЛК и транзисторные элементы управления	К-4
Цепи с большим количеством розеток в медицинских учреждениях, ИБП без дополнительной входной фильтрации, оборудование производственных или сборочных линий, школы и учебные заведения	К-13
Преобразователи частоты системы с особым оборудованием для обработки данных, отделения интенсивной терапии и реанимации	К-20
Многопроводные розеточные цепи в коммерческих, промышленных, медицинских и учебных лабораториях	К-30
Прочие нагрузки, генерирующие очень большое количество гармонических искажений	К-40

**Влияние преобразователей частоты на надежность технологического процесса**

Наличие гармоник может вызывать и более серьезные проблемы, чем увеличение энергопотребления или дополнительные затраты, связанные с приобретением компонентов повышенной мощности и снижению экологичности предприятия. Речь идет о проблеме надежности, которая включает в себя, помимо прочего, надежность источника питания, обеспечивающего работу систем и выполнение процессов на объекте. Сбой энергоснабжения чреват критическими последствиями для объектов повышенной важности. Так, в больницах они могут подвергнуть опасности жизнь пациентов, а на производственных линиях — причинить огромный материальный ущерб. Центрам обработки данных каждая минута простоя в среднем обходится в 5600 долларов США, а связанный с простым репутационный ущерб еще выше.<sup>5</sup>

По этой причине генераторы, обеспечивающие такие объекты резервным питанием, должны быть готовы к аварийным ситуациям, которые возможны при питании нелинейных нагрузок с высоким содержанием гармоник. Практическая рекомендация заключается в том, что мощность генератора, питающего 6-пульсные приводы, должна быть увеличена в 2–2,5 раза. Если у генератора недостаточно мощности, его автоматический регулятор напряжения может работать неправильно по причине чрезмерных гармоник, и в таких условиях генератор может отключиться.

Еще один фактор надежности технологического процесса заключается в возможности передавать номинальную мощность оборудованию, управляемому преобразователем частоты. Это не всегда просто обеспечить. Например, в туннелях большой протяженности кабели электродвигателей проложены на несколько сотен метров, что может привести к значительному падению напряжения и снижению напряжения на стороне электродвигателей вентиляторов. При штатной работе это может вызвать более высокую концентрацию выхлопных газов от транспортных средств и ухудшение видимости внутри туннеля в часы пик. В аварийных же ситуациях вентиляторы дымоудаления могут не справиться с удалением дыма с заданной эффективностью, создавая риски безопасности людей, находящихся в туннеле.

Одно из решений проблемы снижения напряжения — использование промежуточных повышающих трансформаторов. С другой стороны, это увеличивает стоимость проекта, а также оказывает негативное влияние на его экологичность из-за увеличения числа компонентов. Другое решение заключается в использовании приводов с активным выпрямителем (AFE) с конденсаторами шины постоянного тока для управления технологическим процессом. Эта технология позволяет повышать напряжение на стороне оборудования до номинального уровня и передавать номинальную мощность на электродвигатель независимо от потери напряжения в кабеле. Технология приводов с активным выпрямителем будет рассмотрена в следующем разделе.

# Технология приводов с активным выпрямителем и ее преимущества по сравнению с другими решениями

В настоящее время на рынке представлено множество технологий приводов, обеспечивающих качество электроэнергии в широком диапазоне показателей. В тех случаях, когда для системы критично низкое содержание гармоник, приводы следует выбирать максимально тщательно, чтобы исключить использование таких дорогостоящих дополнительных компонентов, как фильтры гармоник, и предупредить любые негативные воздействия на надежность технологического процесса.

## Что такое технология приводов с активным выпрямителем (AFE) с конденсаторами шины постоянного тока?

В настоящем документе рассматриваются приводы с активным выпрямителем (AFE) с конденсаторами шины постоянного тока и их преимущества. Ниже будет более подробно описана сама технология.

Приводы управляют частотой вращения и крутящим моментом электродвигателей переменного тока в соответствии с потребностями приводимого оборудования, изменяя входную частоту и напряжение электродвигателя. Приводы устанавливаются между источником питания и электродвигателями и регулируют подаваемую на них мощность. В приводе мощность сначала проходит через выпрямитель, который преобразует напряжение переменного тока в напряжение постоянного тока. Затем напряжение постоянного тока подается на конденсаторы привода, которые выравнивают форму волны электрического сигнала. На следующем этапе инвертор изменяет поступающее напряжение постоянного тока обратно на переменное напряжение перед его подачей на электродвигатель. Инвертор регулирует фактическую частоту и напряжение, подаваемые на электродвигатель. В результате электродвигатель работает не с номинальными значениями частоты вращения и крутящего

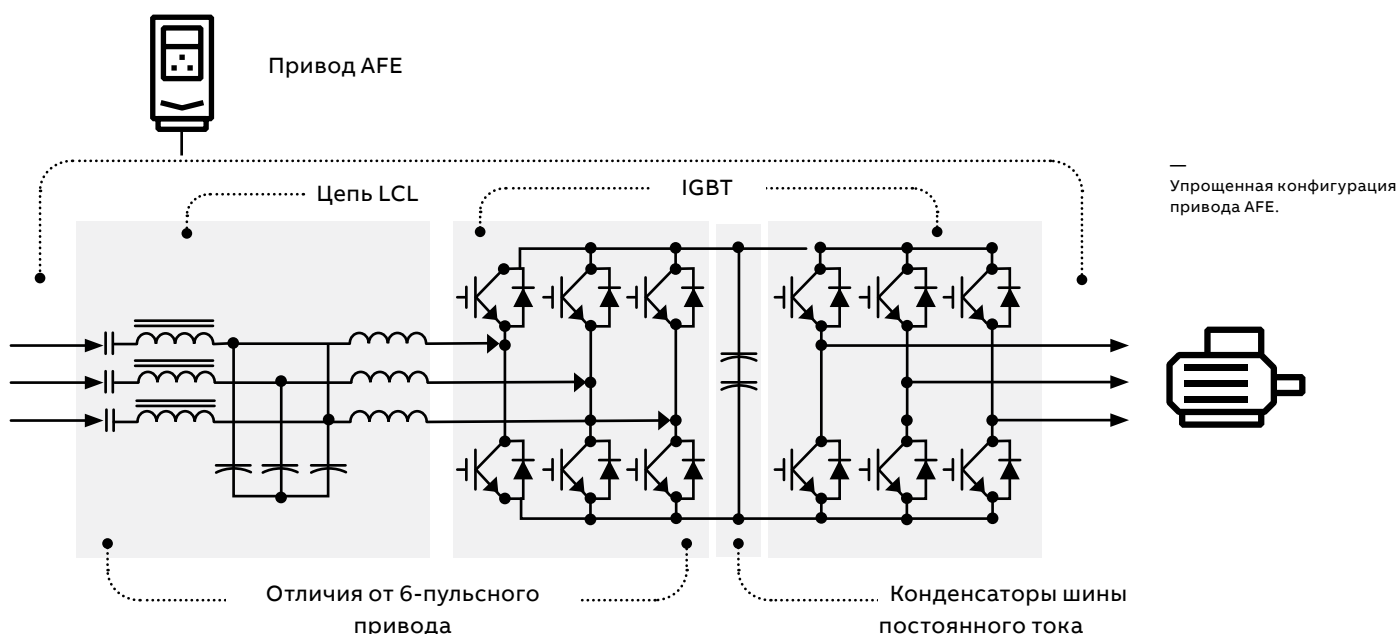
момента, а с измененными в точном соответствии с требованиями технологического процесса. Это позволяет существенно увеличить энергоэффективность и надежность технологического процесса, а также качество конечного продукта.

Привод с активным выпрямителем также преобразует переменный ток (AC) в постоянный (DC), а затем снова преобразует постоянный ток в переменный, по аналогии с традиционным 6-пульсным преобразователем частоты. Разница между 6-пульсным приводом и приводом с активным выпрямителем заключается в том, как приводы преобразуют переменный ток в постоянный, а также в электронике, которая обеспечивает такое преобразование.<sup>6</sup>

В приводах с активным выпрямителем биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) заменяют традиционные диодные выпрямители 6-пульсных приводов (преобразователи переменного тока в постоянный).

На протяжении многих лет преобразователи частоты используются для управления электродвигателями с использованием выходных IGBT-транзисторов для генерации синусоидального тока питания электродвигателей.

В приводах с активным выпрямителем точное управление







— В моделях приводов ACS880 (для промышленного применения), ACS580 (для HVAC-систем) и ACQ580 (для систем водоснабжения) со сверхнизкими гармониками реализована технология активного выпрямителя с конденсаторами шины постоянного тока.

входными IGBT-транзисторами позволяет получить синусоидальную форму волны тока, получаемого из сети.

Еще одно различие между приводами с активным выпрямителем и 6-пульсными приводами заключается в том, что они имеют схему LCL (индуктивно-емкостно-индуктивную схему), встроенную перед входными IGBT-транзисторами. Схема LCL также позволяет устранить гармоники выше частоты переключения IGBT-транзисторов. Эти особенности обеспечивают содержание гармоник тока в сети ниже 3 %, а традиционное 6-пульсное решение обеспечивает THDi около 40 %. Приводы с активным выпрямителем с конденсаторами шины постоянного тока изначально не генерируют гармоники, в то время как другие технологии преобразователей частоты могут потребовать использования дорогостоящих дополнительных решений для снижения содержания гармоник до минимума.

**Преимущества приводов со сверхнизким уровнем гармоник**

Компания АВВ предлагает широкий ассортимент приводов со сверхнизким уровнем гармоник (ULN) общего и специального назначения для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC), водоснабжения и водоотведения. В этих приводах используется технология активного выпрямителя, которая предлагает множество преимуществ для промышленности.

Благодаря низкому THDi (всего 3 %) предприятия могут избежать в новых проектах чрезмерного увеличения мощности компонентов сетей энергоснабжения, таких как генераторы, трансформаторы, распределительные устройства и кабели, а также повысить экологичность проектов за счет оптимизированного расхода материалов.

В проектах переоснащения сетей энергоснабжения с уже имеющейся инфраструктурой приводы AFE позволяют предотвратить перегрев оборудования сети и его преждевременный выход из строя, что возможно в случаях, когда содержание гармонических искажений слишком велико и превышает устойчивость сети. Приводы AFE также позволяют существующим трансформаторам и генераторам, работающим при полной мощности, получать дополнительную нагрузку от преобразователей частоты без необходимости их замены на более мощные.

Помимо гармонических искажений, которые являются составляющей искажения реактивной мощности, приводы со сверхнизким уровнем гармоник также снижают компонент смещения реактивной мощности. Искажения тока и напряжения являются результатом коммутации в электронных устройствах силовой электроники, тогда как смещение тока и напряжения приводит к тому, что их волны не совпадают по фазе. Это происходит по причине индуктивных и емкостных нагрузок в сети. Примеры типичных индуктивных нагрузок включают в себя двигатели, приводящие в действие различное оборудование, а хорошим примером емкостных нагрузок являются компьютерные серверы. Реактивная мощность не служит для выполнения какой-либо полезной работы, но она должна подаваться на индуктивные или емкостные нагрузки для поддержания стабильности напряжения в сети.



— Истинный коэффициент мощности (PF) представляет собой отношение между двумя составляющими реактивной мощности — коэффициентами мощности искажения и смещения.

Коэффициент мощности искажения — это отношение тока основной гармоники и полного тока, содержащего гармонические искажения:  $1 / \sqrt{1+THD_i^2}$

Коэффициент мощности смещения — это отношение активной мощности к полной мощности без гармонических искажений, также называемое  $\cos\phi$ :  $P/S1$ .

Истинный коэффициент мощности — это произведение коэффициента мощности искажения и коэффициента мощности смещения:  $\cos\phi \cdot 1 / \sqrt{1+THD_i^2}$

При отсутствии гармонических искажений (THDi = 0) и реактивной мощности, вызванной индуктивными или емкостными нагрузками, ток и напряжение совпадают по фазе, что означает  $\phi = 0^\circ$  и  $\cos\phi = 1$ , суммарный коэффициент мощности = 1.



— Рекуперативные приводы ABB ACS880 со сверхнизким уровнем гармоник обеспечивают дополнительные преимущества в системах, в которых возможна рекуперация энергии.

автономных компенсаторов реактивной мощности на объектах, что дополнительно снижает затраты пользователей.

Приводы со сверхнизким уровнем гармоник также повышают надежность оборудования и технологических процессов. Благодаря минимальному уровню генерируемых гармоник такие приводы не приводят к перегрузкам сети из-за повышенного тока сети, что, как следствие, предотвращает остановку технологических процессов. Также не происходит отказов подключенных устройств по причине искажения тока.

Для оценки того, сколько реактивной мощности присутствует в сети, используется параметр, называемый коэффициентом мощности. Этот коэффициент указывает на взаимосвязь между активной мощностью, служащей для выполнения работы, и полной мощностью, подаваемой в цепь. Чем ближе коэффициент мощности к 1, тем меньше реактивной мощности присутствует в сети, тем ниже линейный ток и тем выше эффективность и надежность сети.

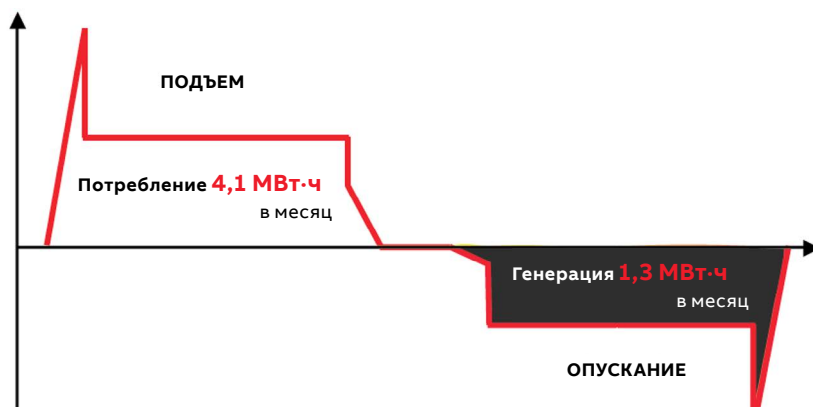
Энергетические предприятия часто штрафуют потребителей за низкий коэффициент мощности, поскольку это требует от них повышения выработки электроэнергии и дополнительных усилий по ее распределению, а также означает более высокие потери в линии электропередачи.

Стандартные преобразователи частоты, в конструкции которых используются конденсаторы на шине постоянного тока, как правило достаточно хорошо компенсируют реактивную мощность управляемых ими индуктивных нагрузок (электродвигателей). Конденсаторы служат для подачи реактивного тока на электродвигатели и предотвращения того, чтобы сети энергоснабжения сами становились источниками реактивного тока.

Тем не менее, более совершенные приводы с активным выпрямителем и конденсаторами на шине постоянного тока, такие как приводы ABB со сверхнизким уровнем гармоник, предлагают дополнительные преимущества. Они способны также компенсировать другие реактивные нагрузки сети и устраняют необходимость в установке

Функция повышения напряжения в приводах ABB со сверхнизким уровнем гармоник обеспечивает номинальное напряжение на клеммах электродвигателя даже при использовании протяженных кабелей и при работе в слабых сетях, что характерно не только для туннелей, но и, например, для станций водоснабжения и водоотведения, расположенных в отдаленных районах. На отдаленных объектах водоснабжения обеспечение номинальной производительности насосов может иметь решающее значение для непрерывного снабжения городских районов пресной водой, а также для удаления сточных и ливневых вод. Перебои в предоставлении таких услуг могут привести к убыткам в миллионы долларов США и иметь разрушительные последствия для затронутых территорий.

Вариант привода со сверхнизким уровнем гармоник с функцией рекуперации энергии, в дополнение ко всем вышеупомянутым преимуществам, позволяет рекуперировать энергию из механических элементов системы, например, во время применения торможения, вместо того, чтобы терять энергию в виде тепла, выделяемого тормозными резисторами или механическими тормозами. Например, такие приводы можно использовать в подъемных кранах или лифтах. Приводы со встроенным блоком рекуперации энергии обеспечивают активное торможение (при этом электродвигатель работает как генератор), а затем возвращают энергию в сеть или аккумулятор для дальнейшего использования.



— Практический пример крана для перемещения мусора с электродвигателем лебедки мощностью 55 кВт, электродвигателем перемещения мощностью 9 кВт, электродвигателем тележки мощностью 4,5 кВт и электродвигателем захвата мощностью 25 кВт. При использовании рекуперативных приводов ABB годовое потребление электроэнергии снижается на 32%, что обеспечивает экономию в размере 2 300 евро при стоимости электроэнергии 0,15 евро/кВт·ч.



Другой тип применения — эпизодическое торможение, цель которого заключается не в рекуперации энергии при обычном торможении, а в максимально оперативной остановке оборудования. Этот вид торможения может использоваться в системах туннельной вентиляции, где в случае пожара может потребоваться остановить оборудование как можно скорее, чтобы предотвратить распространение дыма.

Существуют различные способы торможения оборудования, которые включают в себя тормозные прерыватели и резисторы, внешние блоки рекуперативного торможения и приводы матричной топологии. Приводы со сверхнизким уровнем гармоник с функцией рекуперативного торможения являются предпочтительным решением по нескольким причинам<sup>7</sup>. Помимо минимизации содержания гармоник и рекуперации энергии, к ним относятся:

- повышение энергоэффективности системы, поскольку рекуперативный блок является неотъемлемой частью привода, а не отдельным компонентом;
- снижение сложности системы, поскольку помимо привода не требуются такие внешние компоненты, как тормозные прерыватели, тормозные резисторы или автономные блоки рекуперации энергии;
- экономия занимаемой площади, поскольку все компоненты являются встроенными;
- уменьшение потребности в кондиционировании воздуха в аппаратной по сравнению с резистивным торможением, поскольку энергия не выделяется в виде тепла.

**Альтернативные технологии снижения гармонических искажений**

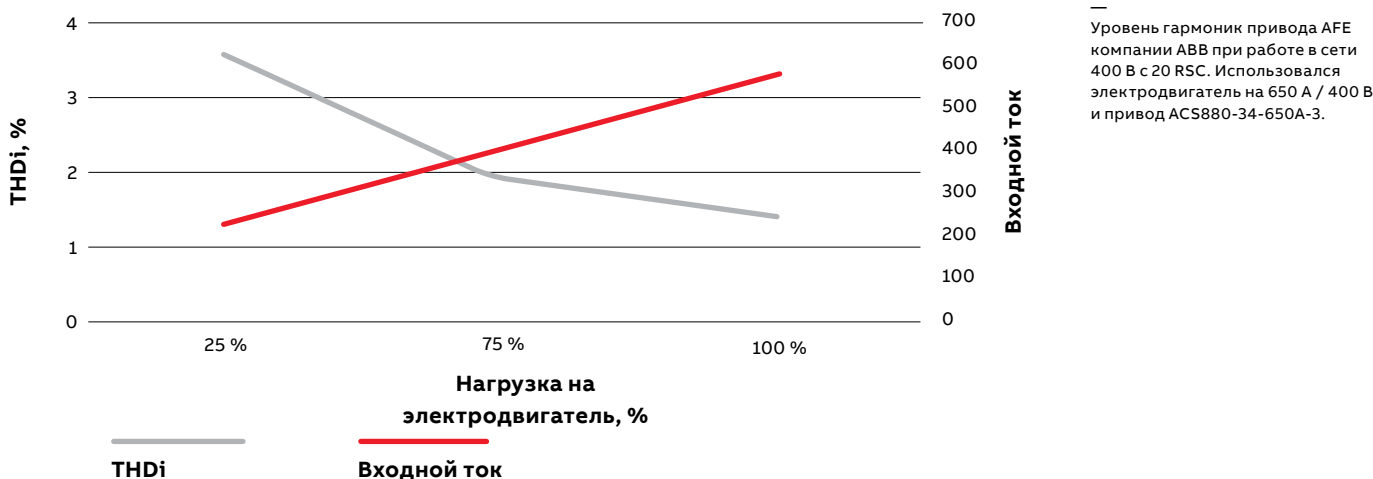
Существует множество различных подходов к снижению гармонических искажений в электрических сетях с 6-пульсными приводами. Все они по-разному

влияют на качество электроэнергии в сети и отличаются по показателям энергоэффективности, рентабельности и надежности. Технология привода с активным выпрямителем с конденсаторами шины постоянного тока считается приоритетным решением по нескольким причинам. Основная причина заключается в том, что такой привод не генерирует гармоники. Это означает отсутствие необходимости в дополнительных методах снижения гармонических искажений.

Одним из важных факторов является эффективность снижения гармонических искажений при работе с неполной нагрузкой, когда большую часть времени работает оборудование с управляемой частотой вращения. Приводы ABB с активным выпрямителем обеспечивают низкий уровень гармонических искажений даже при частичных нагрузках, в то время как, например, пассивные фильтры имеют определенные ограничения.

Пассивные фильтры гармоник настраиваются на конкретную частоту гармоник, которые необходимо устранить. Несколько пассивных фильтров могут быть установлены параллельно, что позволяет сократить значительные искажения, вызванные большим количеством гармонических частот, но это приводит к увеличению площади установки и расходов. Системы пассивных фильтров подбираются в соответствии с нагрузкой, и при изменении профиля нагрузки пассивные фильтры также должны быть заменены.

Также следует помнить, что при нагрузках ниже 20–30 % конденсаторы пассивных фильтров необходимо отключать для предотвращения отрицательного воздействия на коэффициент мощности установки и проблем с питанием генератора, а это оказывает негативное влияние на возможность снижения гармонических искажений.



— Уровень гармоник привода AFE компании ABB при работе в сети 400 В с 20 RSC. Использовался электродвигатель на 650 А / 400 В и привод ACS880-34-650A-3.

**Содержание гармонических искажений при номинальной нагрузке**

	6-пульсный выпрямитель без дросселя	6-пульсный выпрямитель с дросселем	6-пульсный привод с пассивным фильтром	6-пульсный привод с активным фильтром	Многопульсный привод	Привод с активным выпрямителем
THDi	> 100 %	~ 40 %	< 10 %	< 7 %	6–10 % (12 пульсов)	< 3 %
и соответствующая форма волны тока					< 6 % (18 пульсов)	

Активные фильтры снижают гармонические искажения гораздо эффективнее по сравнению с пассивными фильтрами, поскольку они обнаруживают несколько гармонических частот, присутствующих в сети: благодаря наличию IGBT-транзисторов в своей конструкции они создают встречные гармонические токи для снижения гармонических искажений, создаваемых нелинейными нагрузками. Однако их эффективность снижения гармоник также значительно меняется с нагрузкой — при нагрузке 50 % THDi может достигать 12–14 %.

Многопульсные приводы являются еще одной альтернативой снижения гармоник. В таких приводах гармонические искажения минимизируются с помощью ряда дополнительных диодов в выпрямителе — в них установлено больше диодов, чем в стандартном 6-пульсном приводе, — но сложность установки, большая занимаемая площадь и необходимость установки фазосдвигающих трансформаторов являются существенными недостатками этой технологии.

На рынке представлено несколько технологий приводов с активным выпрямителем. Помимо активных выпрямителей с конденсаторами на шине постоянного тока, существуют также приводы AFE без конденсаторов на шине постоянного тока, называемые приводами матричной топологии.<sup>6</sup> Исключение конденсаторов из конструкции привода может снизить стоимость, но это отрицательно сказывается на его эффективности и создает значительные ограничения в отношении выходного напряжения привода, гармонических характеристик, коэффициента мощности и функции контроля потери мощности.

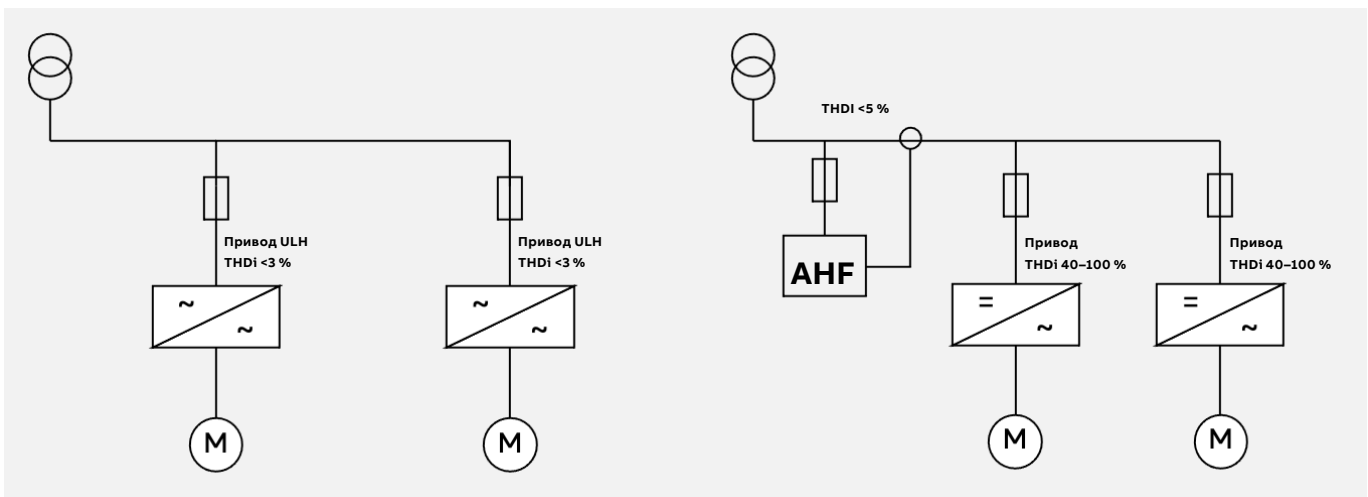
Например, привод AFE без конденсаторов может обеспечить не более 92 % выходного напряжения при работе в режиме с низким уровнем гармоник с THDi около 5 %. Двигатели, которые не получают полное напряжение, не могут создавать номинальный крутящий момент на полной частоте вращения, кроме тех случаев, когда они потребляют дополнительный ток для компенсации отсутствия напряжения. Однако из-за этого происходит перегрев электродвигателя, что сокращает срок его службы. В тех случаях, когда приводы с матричной топологией работают в режиме максимального выходного напряжения, содержание гармонических искажений тока может достигать 10 %. Это выше

общепринятого отраслевого предельного значения THDi для приводов с низким уровнем гармоник (5 %), которое основывается на применении строгого стандарта IEEE 519 непосредственно к приводу.

Приводы AFE с конденсаторами шины постоянного тока не имеют этой проблемы, и они обеспечивают полное напряжение электродвигателя, при этом уменьшая гармонические искажения до минимума.

При сравнении различных технологий снижения гармонических искажений важно учитывать их влияние на энергоэффективность системы. Разумеется, приводы с активным выпрямителем имеют более низкий КПД, чем традиционные 6-пульсные приводы по причине наличия в их конструкции дополнительного активного блока выпрямителя (IGBT-транзисторы). Однако фильтры гармоник, обеспечивающие такое же снижение гармоник, также вызывают потери в системе, которые зачастую недооценивают. В действительности общие потери в системах с приводами со сверхнизким уровнем гармоник такие же или ниже, но по сравнению с отдельными фильтрами гармоник они обеспечивают дополнительные преимущества — равный единице коэффициент мощности и устранение падения напряжения на клеммах электродвигателя.

Для групп приводов часто рекомендуется использовать активные фильтры снижения гармоник (с одним фильтром для нескольких приводов), поскольку это делает системы более рентабельными. Но иногда игнорируется тот факт, что активные фильтры снижают гармонические искажения только в сторону сети энергоснабжения, в то время как высокие значения THDi присутствуют в системе на всем пути от источника гармонических искажений до активного фильтра. Это означает повышенные потери энергии в нижней части системы, снижение надежности, а также риск ее перегрузки по причине чрезмерного содержания гармонических искажений в случаях отказа активного фильтра гармоник. При использовании привода с активным выпрямителем гармонические искажения приводом попросту не генерируются, что позволяет устранить недостатки других технологий снижения гармонических искажений.



— Подавление гармонических искажений в системах с помощью приводов со сверхнизким уровнем гармоник и с использованием активных фильтров гармоник (AHF).

### Снижение уровня гармоник с помощью пассивного фильтра

Содержание гармоник при номинальной нагрузке = 10 %

КПД системы = 87 %



### Снижение уровня гармоник с помощью активного фильтра

Содержание гармоник при номинальной нагрузке = 5 %

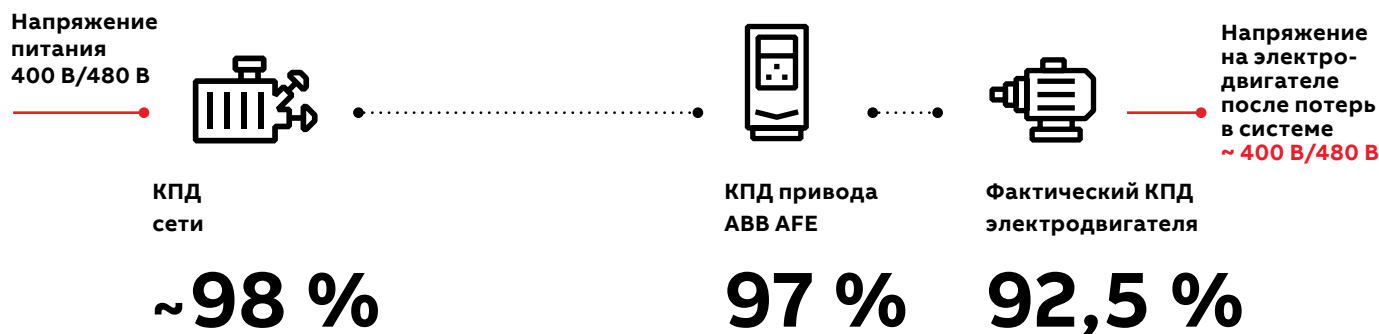
КПД системы = 85,7 %



### Снижение уровня гармоник с помощью приводов с активным выпрямителем

Содержание гармоник при номинальной нагрузке = 3 %

КПД системы = 87,9 %



# Заключение

Преобразователи частоты позволяют экономить значительное количество энергии за счет управления частотой вращения электродвигателя в соответствии с потребностями приводимого оборудования. При этом перед окончательным выбором решения крайне важно оценить влияние преобразователя частоты на питающую сеть, поскольку некоторые частотно-регулируемые приводы могут оказать отрицательное воздействие на качество электроэнергии, что приведет к снижению энергоэффективности и надежности системы, а также к увеличению стоимости проекта.

Для систем, требующих минимального содержания гармоник, что типично для критически важных объектов, оптимальным решением являются преобразователи частоты с активным выпрямителем и конденсаторами на шине постоянного тока, такие как приводы ABB со сверхнизкими гармониками. Они гарантируют эффективность работы сети энергоснабжения и обеспечивают контролируемую надежность технологического процесса. Существенное снижение капитальных и эксплуатационных затрат за счет применения приводов с активным выпрямителем со сверхнизким уровнем гармоник делает их предпочтительным выбором для владельцев предприятий и энергетических компаний.

- (1) Руководство по гармоническим искажениям в приводах переменного тока. Техническое руководство № 6. ABB Drives, 2017.
- (2) Анализ энергопотребления в коммерческих зданиях. Информационно-аналитическое управление министерства энергетики США (EIA), 2016.
- (3) Анализ энергопотребления в производстве — молочная промышленность. Информационно-аналитическое управление министерства энергетики США (EIA), 2010.
- (4) Предлагаемые требования и сроки вступления в силу первой версии стандарта для сухих трансформаторов общего назначения и силовых трансформаторов UL1561. Underwriters Laboratories, 1991.
- (5) Стоимость простоев. Исследование Gartner, 2014.
- (6) Технологии приводов с активным выпрямителем. ABB Drives, 2019.
- (7) Электрическое торможение. Техническое руководство № 8. ABB Drives, 2018.



---

**ABB**

Контактный центр обслуживания клиентов ABB  
в России:

Бесплатный звонок: 8 800 500 222 0

e-mail: [contact.center@ru.abb.com](mailto:contact.center@ru.abb.com)