

Интегрированные электроприводы переменного тока среднего напряжения “Perfect Harmony”: новый стандарт качества преобразования энергии

1. Электроприводы переменного тока среднего напряжения

Данный класс электроприводов является базовым для общепромышленных применений таких, как насосы, вентиляторы, транспортные системы, технологические агрегаты непрерывно действия при мощностях от сотен кВт до десятков МВт. В качестве приводных двигателей используются синхронные машины с электромагнитным возбуждением, асинхронные короткозамкнутые двигатели или асинхронные двигатели с фазным ротором. Как правило, режимы работы электроприводов в рассматриваемых применениях, длительные, требуемый диапазон регулирования скорости редко превышает 1:10 при точности регулирования угловой скорости не выше 1%, а перегрузочная способность по моменту не требуется. Либо меньше 1,1 – 1,2.

Разгон и торможение осуществляется по линейному закону изменения угловой скорости с ограничением момента или тока. К дополнительным требованиям относятся возможность автозапуска при восстановлении питающего напряжения с автоподхватом вращающегося двигателя.

Рассмотренные требования легко достигаются с использованием современных скалярных и векторных методов управления как с использованием датчика угловой скорости, так и в режиме бездатчикового управления гарантируются всеми ведущими производителями электроприводов.

Следующая группа требований, актуальна для рассматриваемого диапазона мощностей, определяет электрическую эффективность преобразования, а так же совместимость преобразователя с сетью и электрической машиной, и включает:

А.1 Коэффициент полезного действия интегрированного преобразователя. Определяется от питающей сети до зажимов двигателя и должен быть максимальным во всем диапазоне рабочих скоростей двигателя.

А.2 Коэффициент мощности входной цепи преобразователя. Определяется амплитудой реактивного тока циркулирующего между преобразователем и сетью. Реактивные токи вызывают дополнительные потери в сети, нагружают входные фидеры, коммутационную аппаратуру, трансформаторы, оказывают отрицательное воздействие на регулирование напряжения в энергосистеме. Коэффициент мощности должен быть максимально близким к единице (потребление чисто активной мощности) во всем диапазоне скоростей и нагрузок двигателя.

А.3 Полный коэффициент гармоник входного тока и напряжения. Определяется количеством высших гармоник в кривой входного тока первой гармоники. Высшие гармоники потребляемого тока, распространяясь по сети вызывают дополнительные потери, нарушают нормальное функционирование электронного (телефоны, компьютерная техника и др.) и электрического оборудования, могут приводить к резонансным явлениям в сети. Из-за неидеальности сетей высшие гармоники тока приводят к искажению формы напряжения и могут вызывать взаимовлияние силового оборудования, в том числе и электроприводов друг на друга. Совместимость потребителей и сети регламентируется стандартом IEEE-519, 1992 года, в соответствии с которым полный коэффициент гармоник тока не должен превышать 5%.

А.4 Полный коэффициент гармоник выходного тока и напряжения.

Выходное напряжение преобразователя, прикладываемое к двигателю, должно в максимально возможной степени приближаться к синусоидальному с минимальным количеством высших гармоник с целью:

- Снижения высших гармоник тока двигателя, вызывающие дополнительные потери в электрической машине, приводящие к пульсациям момента двигателя и нежелательным дополнительным нагрузкам в механической части электропривода, которые могут также вызвать резонансные явления и генерировать акустический шум.
- Снижение амплитуды и величины dV/dt прикладываемого напряжения для уменьшения отрицательного влияния на изоляцию обмоток и соединительного кабеля, снижение вероятности возникновения «стоячих» волн при значительной длине соединительного кабеля.

А.5 Исключение существенного влияния синфазных напряжений (common mode voltages). Для защиты двигателя от синфазных напряжений требуется применение специальных средств изоляции.

2. Существующие технологии построения преобразователей для электроприводов среднего напряжения

В настоящее время ведущие мировые производители предложили четыре базовые технологии построения электроприводов переменного тока среднего напряжения:

- a) Преобразователи с инвертором напряжения, имеющим нейтральную точку (Neutral Point Clamp Inverter);
- b) 3-х уровневые высоковольтные инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ);
- c) инверторы тока с ШИМ;
- d) инверторы по технологии “Perfect Harmony”

Первые три выполнены по высоковольтной технологии на основе запираемых тиристоров (GTO или IGCT) или последовательно включенных IGBT транзисторов, в то время как последняя конфигурация является исключительно низковольтной, позволяющей управлять электрическими машинами на среднем напряжении. На Рис. 1. представлена типовая структура AC-DC-AC преобразователя, имеющего инвертор с нейтральной точкой.

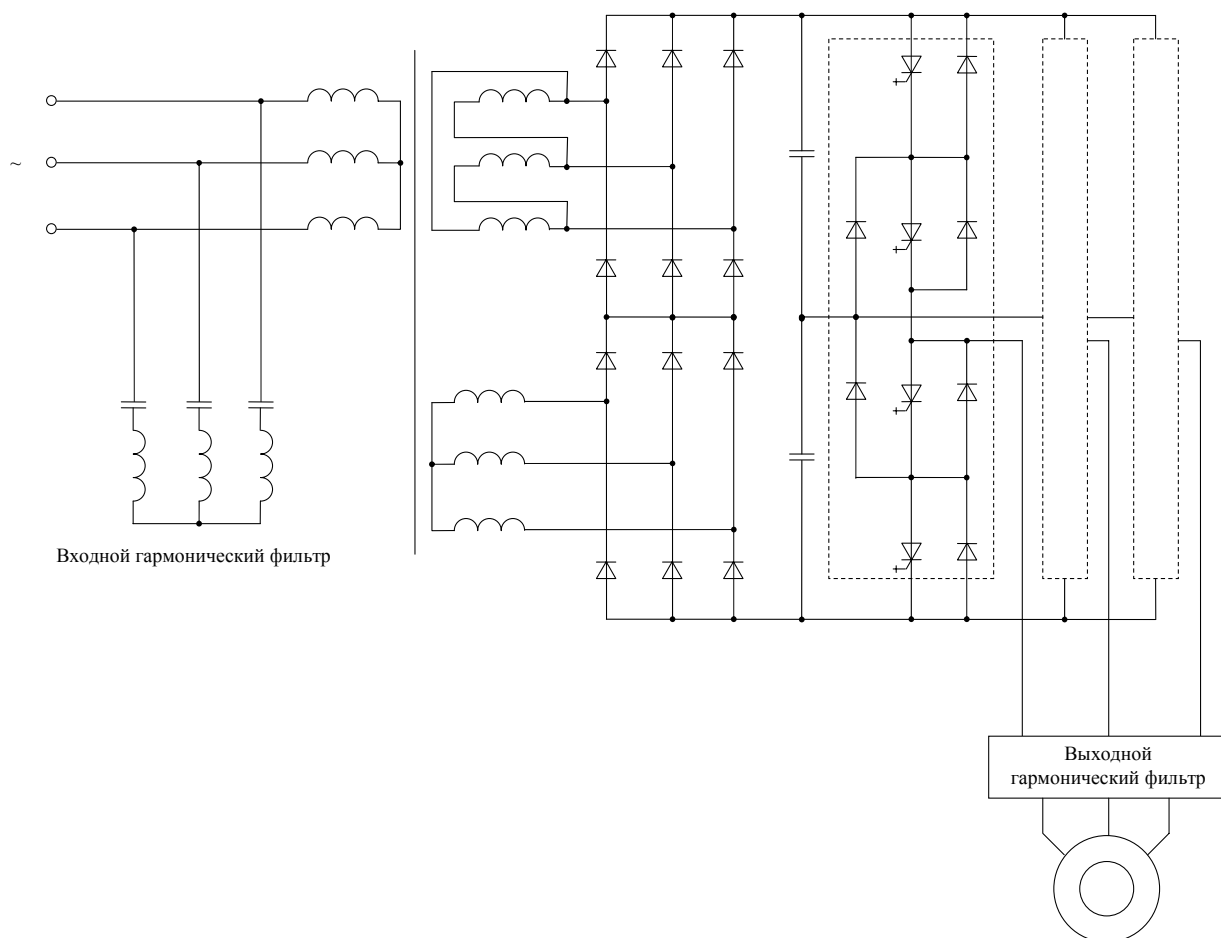


Рис. 1. Преобразователь с инвертором напряжения, имеющим нейтральную точку.

Преобразователь на Рис. 1. включает: входной фильтр, разделительный трансформатор, 12-пульсный выпрямитель, инвертор с нейтральной точкой на 12 IGBT и 18 обратных диодах, выходной гармонический фильтр. При рассмотренной конфигурации выходное напряжение инвертора содержит

количество ступеней, соответствующее случаю “Perfect Harmony” с одной силовой ячейкой (см. далее). В случае инвертора тока с ШИМ входной выпрямитель выполняется управляемым, с помощью которого регулируется ток в звене постоянного тока. Типовая конфигурация такого преобразователя показана на Рис. 2. При этом входной трансформатор может отсутствовать, тогда используется только одна секция управляемого тиристорного выпрямителя. Схема управления при этом является шестипульсной.

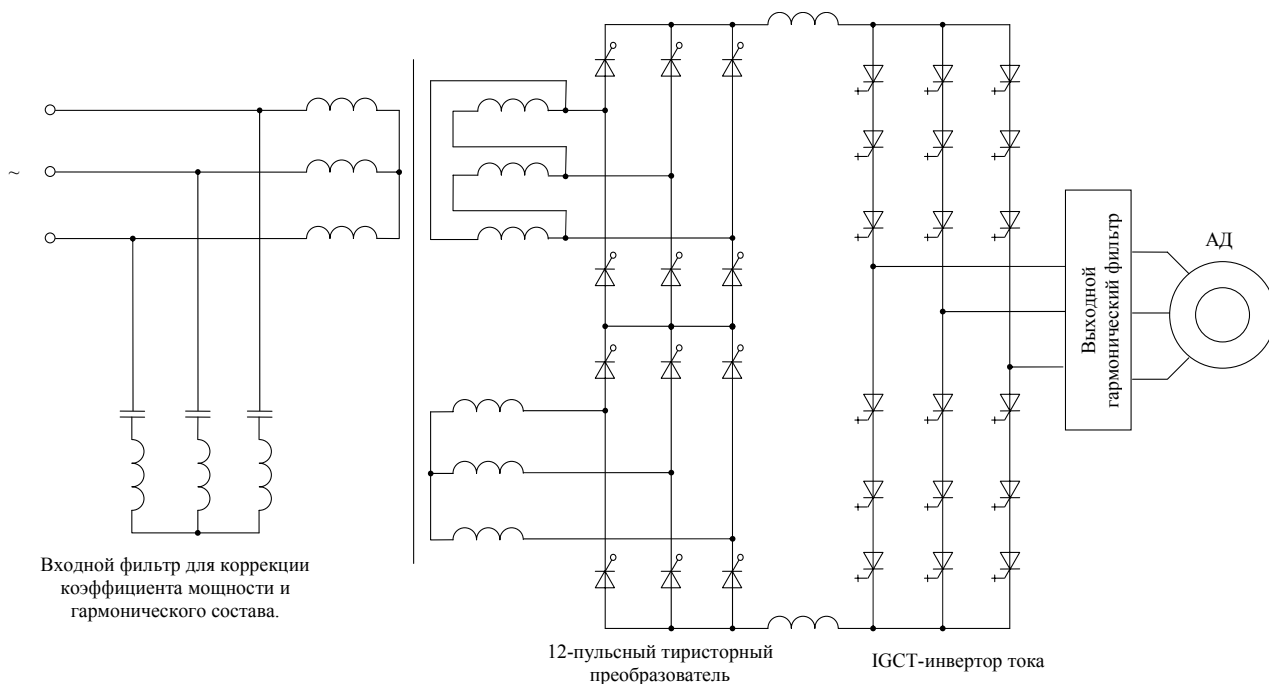


Рис. 2. Преобразователь с инвертором тока.

Особенностью структуры показанной на Рис. 2, является наличие входного фильтра для коррекции коэффициента мощности, который при такой конфигурации, в случае вентиляторной нагрузки, пропорционален угловой скорости, то есть снижается примерно пропорционально частоте.

Принципиальным недостатком преобразователей построенных по высоковольтной технологии, является необходимость в установке входного и выходного фильтров для достижения преобразований А.3 и А.4, сформулированных ранее. Из-за этого увеличиваются потери, габариты и цена изделия.

Рядом производителей используется гибридная технология с двумя трансформаторами: входным понижающим и выходным повышающим, как это изображено на Рис. 3. При этом инвертор выполнен по низковольтной технологии. Недостатки такой структуры очевидны и состоят в первую очередь в ограниченном диапазоне регулирования частоты ($>25-30$ Гц).

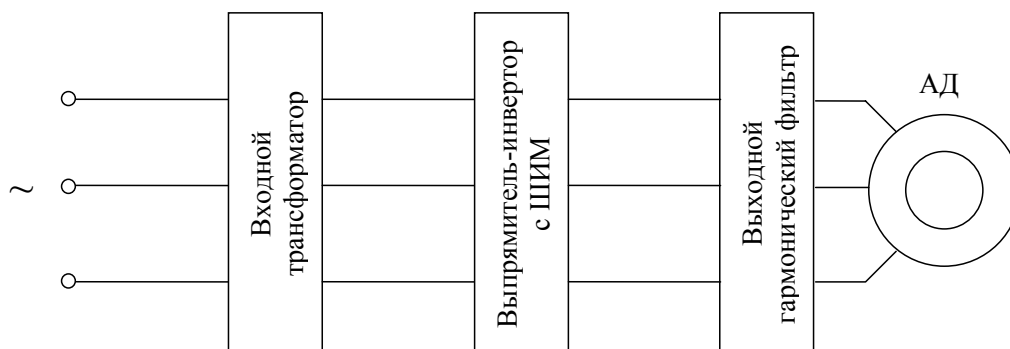


Рис. 3. Структура преобразователя с низковольтным инвертором, содержащим понижающий и повышающий трансформаторы.

3. Технология преобразователей “Perfect Harmony”

В середине 90-х годов прошлого столетия фирмой “Robicon” (в настоящее время ASI Robicon) был предложен новый подход к построению преобразователей частоты среднего напряжения, получивший название “Perfect Harmony”. Принципиальной особенностью является тот факт, что “Perfect Harmony” использует хорошо отработанную технологию низковольтных IGBT-преобразователей частоты. На Рис. 4 показана топология преобразования на 2400В, а так же схема силовой ячейки. Преобразователь выполнен по многоуровневой схеме, предполагающей использование многоуровневой ШИМ. Каждая фаза двигателя получает питание от трех последовательно соединенных силовых ячеек. Группы силовых ячеек соединены в звезду. Каждая из ячеек получает питание от изолированной низковольтной обмотки разделительного трансформатора, рассчитанной на 480В с $1/9$ полной мощности и является однофазным ШИМ

преобразователем. Такой преобразователь может формировать выходное напряжение до 480В с частотой до 120 Гц. При этом каждый однофазный преобразователь содержит IGBT ключи на напряжение 600В. В случае выходного напряжения 6 кВ, инвертор содержит 15 силовых ячеек, по 5 в каждой из фаз. Выходное напряжение индивидуальной ячейки равно 690В и содержит ключи рассчитанные на 1400В.

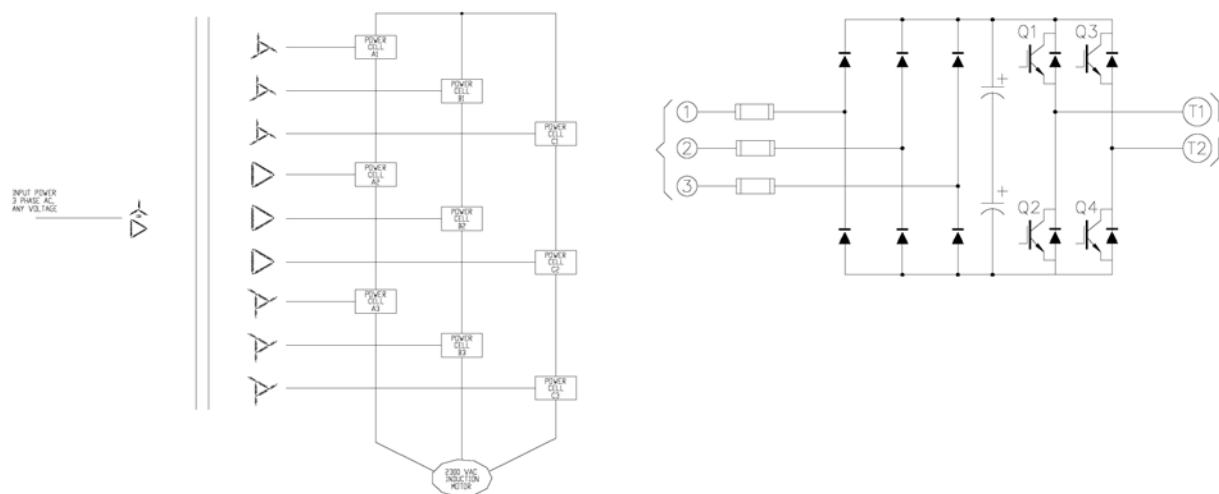


Рис. 4. Топология преобразования и схема силовой ячейки для преобразователей “Perfect Harmony”.

Способ формирования многоуровневой ШИМ для инвертора, содержащего 3 силовые ячейки в фазе, показан на Рис. 5. Ключи каждой из ячеек коммутируются таким образом, что напряжение равно сумме напряжений генерируемых на каждой из них. При трех ячейках в фазе возможно получение 7 уровней фазного напряжения, а при 5 ячейках – 11. Отметим, что величина максимально ступенчатого напряжения, прикладываемого к обмотке двигателя не превышает напряжения индивидуальной ячейки. ШИМ для каждой из ячеек составляет 600 Гц, в то время как эффективная частота коммутации равна 3000 Гц для случая трех ячеек в фазе, т.е. промежуток выходного напряжения между двумя фиксированными значениями формируется с помощью ШИМ с высокой точностью. Содержание высших гармоник в кривой выходного напряжения при этом таково, что они эффективно фильтруются индуктивностями

обмоток двигателя без установки дополнительного выходного фильтра гармоник.

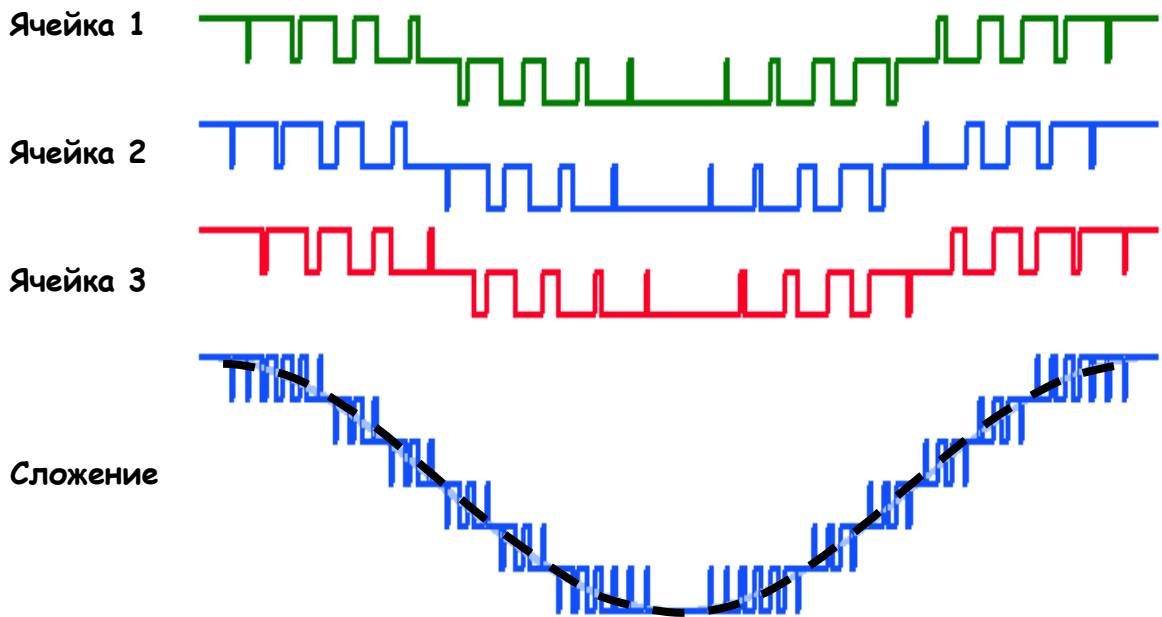


Рис. 5. Способ формирования многоуровневой ШИМ для инвертора “Perfect Harmony”, содержащего 3 силовые ячейки в фазе.

Поскольку каждая из силовых ячеек, Рис. 4, включает шестипульсную схему выпрямления, то суммарная пульсность выпрямления многоуровневого преобразователя пропорциональна числу ячеек в фазе, то есть при 3-х ячейках она соответствует 18, а при 5-ти – 30. Отметим, что выпрямление для преобразователей, показанных на Рис. 1 и 2, является 12-ти пульсным. Благодаря такой конфигурации входной части преобразователя уже при 3 ячейках в фазе суммарный коэффициент гармоник входного тока не превышает 3 % (требование стандарта IEEE – 5%), что позволяет исключить входной гармонический фильтр.

Таким образом, технология преобразователей “Perfect Harmony” позволяет получить показатели качества преобразования энергии, которые трудно достижимы при использовании других структур преобразования. Основными из них, которые в полной мере удовлетворяют требованиям А.1-А.5, является:

1 Отсутствие дополнительных фильтров. В базовой конфигурации нет необходимости в установке входных фильтров для коррекции коэффициента мощности и гармонического состава входного тока, а также выходного фильтра гармоник. “Perfect Harmony” состоит лишь из разделительного трансформатора и выпрямительно-инверторной части. В случае более высоких требований к качеству входных-выходных токов преобразователя устанавливаются дополнительные фильтры, которые являются однако более «легкими» в сравнении с другими решениями. Благодаря этому достигается:

1.a Повышение КПД системы преобразования, уменьшение габаритов и стоимости. КПД преобразователя “Perfect Harmony” составляет 98%, а включая трансформатор и возможные дополнительные фильтры выше 96-97%. Такие показатели превосходят существующие показатели для других систем.

1.b Входной коэффициент мощности более 0,95 во всем диапазоне рабочих скоростей без дополнительных корректирующих фильтров.

Для сравнения на Рис. 6 показаны зависимости коэффициента мощности и КПД для “Perfect Harmony” и инвертора тока с ШИМ (коэффициент мощности показан без коррекции).

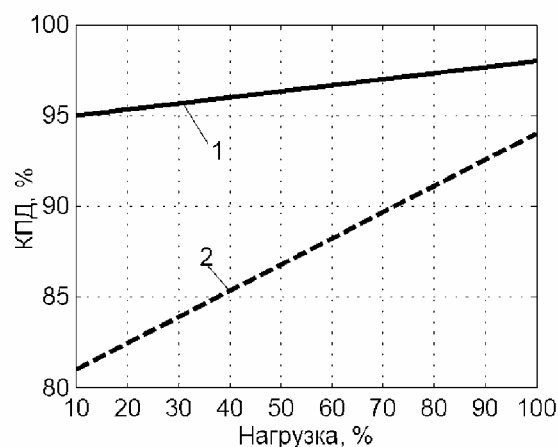
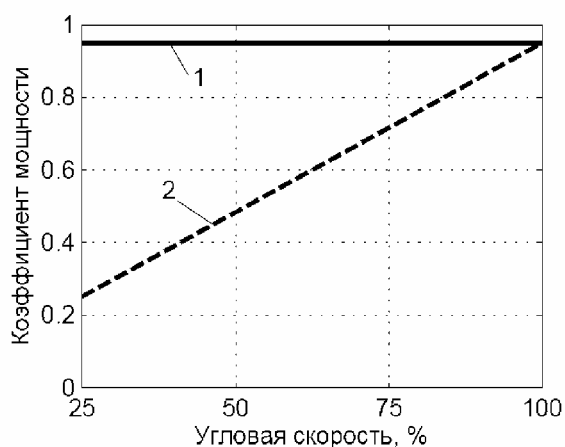


Рис. 6. Сравнительные характеристики: 1 – “Perfect Harmony”, 2 – инвертор тока с ШИМ.

Габаритные размеры “Perfect Harmony” меньше чем у всех существующих аналогов.

2 Высокий уровень совместимости преобразователя с питающей сетью.

Требования стандарта IEEE-519 выполняются без дополнительного входного фильтра. Полный коэффициент гармоник входного тока около 3% при трех силовых ячейках в фазе и около 1% при пяти. На Рис. 7 представлены формы входного напряжения и тока для типового инвертора напряжения (800 кВт) с 12-ти пульсным выпрямителем и “Perfect Harmony” с 4-мя силовыми ячейками в фазе, что соответствует 24-х пульсной системе выпрямителя. Полные коэффициенты гармоник для стандартного инвертора составляют по току – 8,8 %, по напряжению 5,9%, в то время как для “Perfect Harmony” эти показатели равны 0,8% и 1,2% соответственно.

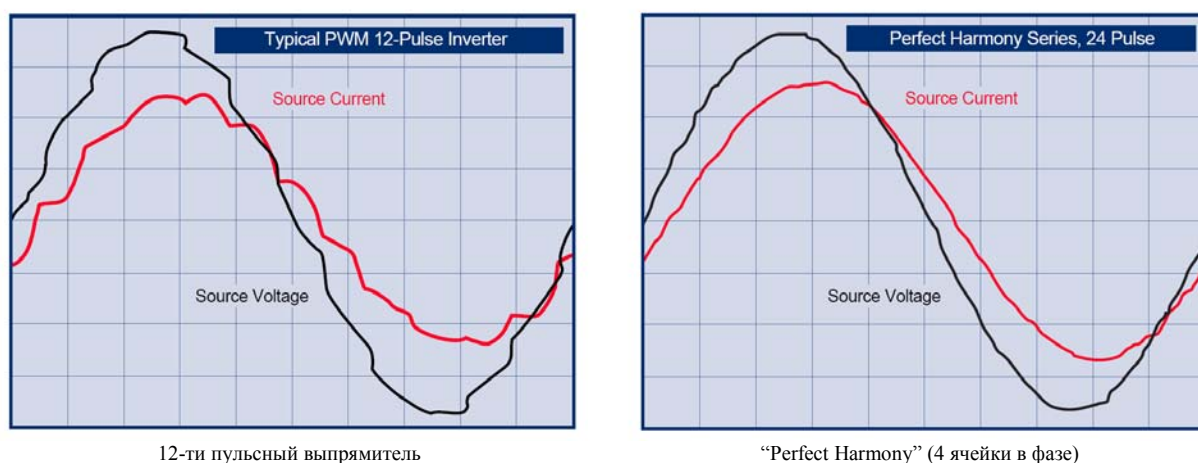


Рис. 7. Входные токи и напряжения (сеть 1100 кВА, 5,75%)

3. Высокое качество выходного напряжения

Многоуровневая ШИМ гарантирует получение синусоидального выходного напряжения и тока без дополнительного фильтра гармоник. Коэффициент гармоник выходного тока при использовании стандартных двигателей не превышает 3% в диапазоне частот 10%-100% независимо от

нагрузки. На Рис. 8 показаны осциллограммы выходного тока работы с вентиляторной нагрузкой.

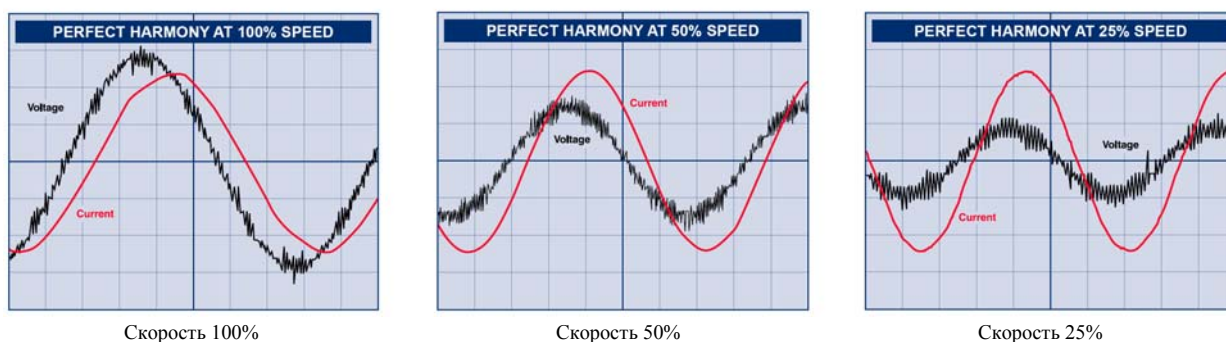


Рис. 8. Осциллограммы выходного напряжения и тока.

Благодаря высокому качеству выходного напряжения и тока “Perfect Harmony” гарантирует :

- 3.1. Использование стандартных асинхронных и синхронных двигателей с их номинальными показателями.**
- 3.2. Снижение вероятности возникновения «стоячих» волн при большой длине соединительного кабеля (до 300 м.)**
- 3.3. Уменьшение пульсации момента двигателя (менее 0,1% во всем спектре частот)**
- 3.4. Снижение акустического шума электрической машины, вызванного ШИМ.**
- 3.5. Защиту двигателя от синфазных напряжений**

4. Высока надежность и ремонтпригодность: функция “by-pass”

Структура силовой части “Perfect Harmony”, базирующаяся на низковольтных силовых ячейках, несмотря на большое количество коммутационных элементов, использует надежные и отработанные ключи IGBT ключи в отличие от высоковольтных IGTC или IGBT в других продуктах. Каждая из ячеек имеет такой запас по напряжению ключей, что при выходе из строя одной из них, оставшиеся могут продолжать длительную работу с некоторым снижением выходной мощности, если

ячейки соответствующих фаз будут закорочены. Такая функция известна как “by-pass” силовых ячеек и осуществляется электронными коммутационными элементами без остановки привода. Поскольку все силовые ячейки одинаковы и представляют интегрированный модуль, то время замены на отключенном преобразователе находится в пределах **10 минут**.

Преобразователь “Perfect Harmony” допускает кратковременное снижение напряжения до **30%** или его полное исчезновение в пределах **5-ти периодов** питающего напряжения без снижения выходных параметров при полной нагрузке. При длительном снижении питающего напряжения допустима длительная работа при пропорционально сниженной скорости вращения двигателя. На Рис. 9. показаны графики выходного и входного напряжений при исчезновении его на 5 периодов.

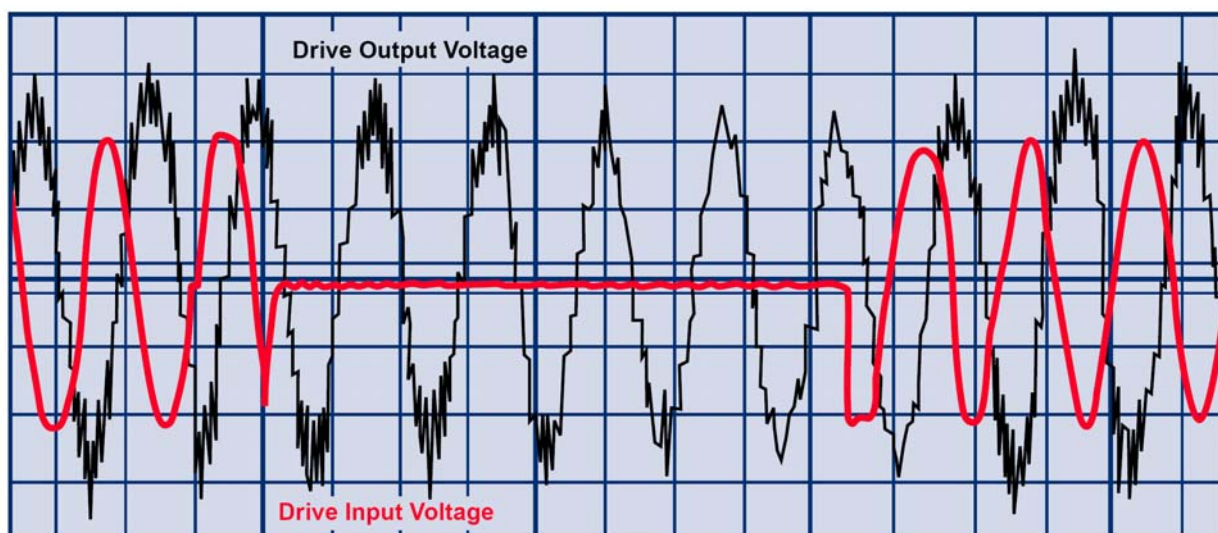


Рис. 9. Переходные процессы при исчезновении питающего напряжения.

5. Общие характеристики “Perfect Harmony”

1. Диапазон мощностей: 300 кВт – 23 000 кВт
2. Диапазон выходных напряжений: 2 300 В – 13 800 В
3. Диапазон регулирования угловой скорости 1:10
4. Точность поддержания угловой скорости без использования датчика выше 0,5 %

5. Выходная частота 250 Гц
6. Разрешающая способность по частоте: 0,1 Гц
7. Входное напряжение +10/-5% (+10/-30% при снижении мощности)

Интегрированный электропривод “Perfect Harmony” обладает стандартными функциями защиты, диагностики, полным набором коммуникационных интерфейсов с использованием всех стандартных протоколов. Выпускается с воздушным или водяным (дублированным) охлаждением. Нарботка на отказ 70000 часов.



6. Заключение

Концепция “Perfect Harmony”, базирующаяся на топологии многоуровневых инверторов с многоуровневой ШИМ, позволила достичь нового уровня показателей качества преобразования энергии в части: коэффициента мощности, формы выходных и входных токов и напряжений, надежности и габаритных размеров, установив таким образом новый стандарт для электроприводов переменного тока среднего напряжения. Опыт эксплуатации более 1500 установок этого класса подтверждает их эффективность.