

Асинхронные электродвигатели управляемые от преобразователя частоты

Техническое руководство



Содержание

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 НОРМАТИВНЫЕ АСПЕКТЫ.....	5
2.1 NEMA MG1 – Моторы и генераторы / «США».....	5
2.2 NEMA - Применения для приводных систем регулирования скорости	5
2.3 IEC 60034 – Вращающиеся электрические машины / «Интернационально».....	5
2.4 Другие технические документы	5
3 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ МАШИН.....	6
4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ШИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ.....	8
4.1 Общее	8
4.2 Типы управления.....	8
5 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ И ЛИНИЕЙ ПИТАНИЯ	9
5.1 Гармоники	9
5.1.1 Нормативные соглашения о гармониках.....	9
5.2 Сетевой реактор / дросель звена постоянного тока.....	10
6 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ	11
6.1 Влияние гармоник на характеристики мотора	11
6.1.1 Нормативные соглашения о выходных гармониках преобразователя	11
6.2 Об энергоэффективности.....	13
6.2.1 Влияние изменения скорости на КПД мотора	13
6.2.1.1 Числовой пример	14
6.2.2 Нормативные соглашения о КПД моторов, управляемых от ПЧ	14
6.3 Влияние преобразователя на подъем температуры в обмотках.....	15
6.4 Критерии, влияющие на подъем температуры моторов WEG при управлении от ПЧ	15
6.4.1 Уменьшение момента	15
6.4.1.1 Рынок NEMA	15
6.4.1.2 Рынок IEC	16
6.4.2 Пусковой момент	16
6.4.3 Максимальный момент	17
6.5 Влияние преобразователя на систему изоляции	17
6.5.1 Время нарастания	17
6.5.1.1 Нормативные соглашения о времени нарастания	17
6.5.2 Длина кабеля	19
6.5.2.1 Эффект короны	19
6.5.3 Минимальное время между соседними импульсами.....	20
6.5.4 Несущая частота	20
6.5.5 Несколько моторов.....	20
6.6 Критерии системы изоляции электродвигателей WEG для управления от преобразователей частоты	21
6.7 Нормативные соглашения о системе изоляции электродвигателей управляемых от преобразователей.....	21
6.8 Рекомендации для кабельных соединений моторов WEG к преобразователям частоты.....	22
6.8.1 Типы кабелей и рекомендации по установке.....	22
6.8.1.1 Незэкранированные кабели.....	22
6.8.1.2 Экранированные кабели	22
6.8.1.3 Рекомендации по установке.....	23
6.9 Влияние преобразователя на напряжение вала электродвигателя и подшипниковые токи	23
6.9.1 Синфазное напряжение.....	23
6.9.2 Эквивалентная схема замещения электродвигателя для высокочастотных емкостных токов.....	24

6.9.3 Методы уменьшения подшипниковых токов в электродвигателях при работе от преобразователей частоты	25
6.10 Критерии защиты от подшипниковых токов электродвигателей WEG, управляемых от преобразователей частоты	25
6.11 Нормативные соглашения о токах, протекающих через подшипники в электродвигателях, управляемых от преобразователей частоты	26
6.12 Влияние преобразователя частоты на акустический шум электродвигателя.....	26
6.13 Критерии касательно шума, излучаемого электродвигателями при работе от преобразователей.....	27
6.14 Нормативные соглашения о шуме электродвигателей управляемых от преобразователей	27
6.15 Влияние преобразователя на механическую вибрацию электродвигателя.....	27
6.16 Критерии к уровням вибрации электродвигателей WEG при работе от преобразователей.....	27
6.17 Нормативные соглашения о механической вибрации электродвигателей при работе от ПЧ	28
7 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ И ПРИВОДНОЙ НАГРУЗКОЙ	28
7.1 Типы нагрузок.....	28
7.1.1 Нагрузки с переменным моментом	28
7.1.2 Нагрузки с постоянным моментом	29
7.1.3 Нагрузки с постоянной мощностью	29
7.2 Скоростные режимы	30
7.2.1 Режим работы с переменной скоростью.....	30
7.2.2 Режим работы с постоянной скоростью.....	30
8 ПОДБОР И АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЙ ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ – ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ.....	30
8.1 Применение с постоянным моментом – компрессор	30
8.1.1 Пример	30
8.1.2 Решение	30
8.2 Применение с квадратичным моментом – центробежный насос.....	31
8.2.1 Пример	31
8.2.2 Решение	31
8.3 Специальное применение – длинный кабель.....	33
8.3.1 Пример	33
8.3.2 Решение	33
8.4 Применение с переменной скоростью / переменным моментом – текстильная промышленность	35
8.4.1 Пример	35
8.4.2 Решение	35
8.5 Пример использования режима оптимального потока WEG.....	36
8.5.1 Пример	36
8.5.2 Решение	36
9 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ФОРМЫ ШИМ	37
9.1 Предупреждение.....	37
9.2 Измерительные приборы.....	37
9.3 Измерение параметров.....	37
9.4 Согласование заземления.....	38
9.4.1 Заземление системы управления	38
9.4.2 Заземление электродвигателя.....	38
9.5 Процедуры измерения	38
9.5.1 Визуализация формы волны	38
9.5.2 Настройка шкалы осциллографа.....	39
9.5.3 Триггер	39
10 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39

1 ВВЕДЕНИЕ



Область отраслевых применений, в которых асинхронные электродвигатели управляются от статических преобразователей частоты быстро расширяется и, хотя многое уже сделано в этом направлении, еще многое должно быть изучено и понято для работы в таких приложениях. Продвижение приводных систем регулирования скорости приводит к необходимости обеспечения специфическими техническими руководствами производителей электрических машин и преобразователей частоты, так что применения могут быть соответствующе разработаны в дополнение к существующим преимуществам, как для эффективности, так и для стоимости.

Это техническое руководство разъясняет основные аспекты, касающиеся применения асинхронных электродвигателей низкого напряжения (< 690 В) с преобразователями частоты, для габаритов моторов не более IEC 355 (NEMA 587).

Прежде всего, упомянуты главные и наиболее соответствующие международные стандарты.

Представлены теоретические основы регулирования скорости электрических машин с помощью статических преобразователей частоты, а также основные характеристики электронных инверторов (преобразователей частоты).

Как только становятся известны основы привода с регулированием скорости, анализируют поведение всей энергетической системы. Каждый компонент силовой системы (линия электропитания – преобразователь частоты - асинхронный двигатель - нагрузка) должен быть правильно подобран, также как и общее взаимодействие между ними, и как результат – регулирование скорости.

Для лучшего понимания вопроса приведены примеры систем регулирования скорости.

Всегда смотрите на техническое разъяснение максимально полно по этому руководству, некоторые спорные пункты акцентированы. Рассматриваются расхождения, существующие между различными стандартами, и представлена точка зрения WEG.



2 НОРМАТИВНЫЕ АСПЕКТЫ

2.1 NEMA MG1 – Моторы и генераторы / «США»

Часть 30 – Замечания по применению электродвигателей для работы на постоянной скорости при синусоидальном питании с гармоническими составляющими и общепромышленными электродвигателями с частотным управлением.. (2006)

Часть 31 – Электродвигатели, управляемые от преобразователей частоты определенного назначения (2006)

2.2 NEMA - Применения для приводных систем регулирования скорости (2001)

2.3 IEC 60034 – Вращающиеся электрические машины / «Интернационально»

Часть 17 – Асинхронные электродвигатели при питании от преобразователей частоты (2006)

Часть 25 – Руководство по проектированию и производству асинхронных электродвигателей для работы от преобразователей частоты

2.4 Другие технические документы

- GAMBICA/REMA Техническое руководство для регулируемого электропривода и электродвигателей
- GAMBICA/REMA Технические отчеты для регулируемого электропривода и электродвигателей
- CSA C22.2 No. 100-2004 Item 12 (Канада) «Моторы и генераторы – промышленные продукты»
- JEM-TR 148-1986 (Япония) «Руководство по применению инверторного привода (преобразователи общего назначения)»
- IEC 60034-18-41 Квалификационные и конструкторские испытания для системы электрической изоляции Типа I, используемой во вращающихся электрических машинах, управляемых от преобразователей частоты
- Статьи и книги по этой теме

3 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Для асинхронных индукционных машин скорость вращения ротора, частота питающего напряжения, количество полюсов и скольжение связаны следующим выражением:

$$n = \frac{120f_1(1-s)}{p}$$

где:

- n : механическая скорость (об/мин)
- f₁ : частота питающего напряжения (Гц)
- p : количество полюсов
- s : скольжение

Анализ вышеприведенной формулы показывает, что механическая скорость мотора является функцией трех параметров. Так, изменение любого из этих параметров будет приводить к изменению скорости мотора как указано в следующей таблице.

Изменение скорости	
Параметр	Характеристика
Количество полюсов	Дискретное регулирование
	Увеличение габарита
Скольжение	Плавное регулирование
	Потери в роторе
	Ограниченный диапазон скоростей
Частота напряжения	Плавное регулирование
	Использование преобразователя частоты

Использование преобразователей частоты в настоящее время является наиболее эффективным методом регулирования скорости вращения электродвигателей. На выходе преобразователя из напряжения постоянной частоты и постоянной амплитуды формируется напряжение, переменное по частоте и амплитуде. Изменение частоты напряжения, подаваемого на зажимы электродвигателя, приводит к изменению частоты вращающегося магнитного поля, которое в свою очередь изменяет механическую скорость вращения вала электродвигателя.

Момент на валу, развиваемый электродвигателем, рассчитывается по формуле:

$$M = k_1 \varphi_m I_2$$

Пренебрегая падением напряжения, обусловленного сопротивлением статора, поток намагничивания рассчитывается по формуле:

$$\varphi_m = k_2 \frac{V_1}{f_1}$$

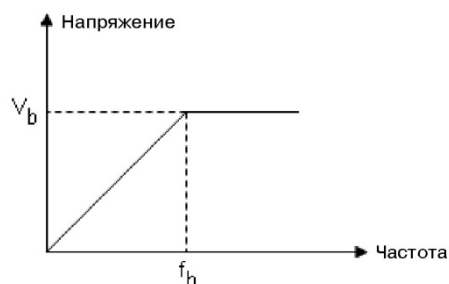
где:

- MТ : момент на валу (Нм)
 - φ_m : поток намагничивания (Wb)
 - I₂ : ток ротора (А) – зависит от нагрузки
 - V₁ : напряжение статора (В)
 - k₁ и k₂ : константы – зависят от материала и исполнения электрической машины
- Учитывая, постоянство момента нагрузки и допуская, что ток зависит от нагрузки, получаем, что изменение питающего напряжения подаваемого на электродвигатель с амплитудой пропорциональной частоте приводит к постоянству потока намагничивания и, следовательно, постоянному крутящему моменту, в то время как ток остается неизменным.

Таким образом, двигатель обеспечивает постоянную корректировку скорости и вращающего момента в отношении механической нагрузки. Потери при этом могут быть сведены к минимуму, в соответствии с условиями нагрузки путем поддержания постоянного скольжения на любой скорости, для заданной нагрузки.

Нижеприведенный график получен из вышеприведенного выражения.

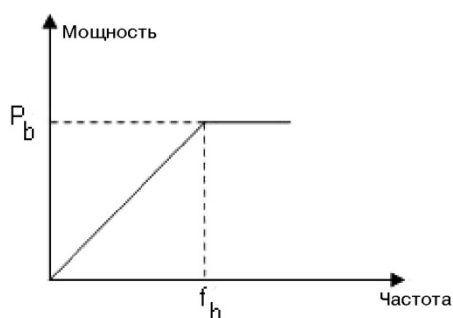
Соотношение V/f остается неизменным до базовой (номинальной) скорости мотора. Выше этой частоты значение напряжения остается неизменным, в то время как частота может увеличиваться, как показано на графике внизу.



Область выше базовой частоты называется областью ослабления поля, в которой поток уменьшается в результате увеличения частоты, и как следствие уменьшается крутящий момент двигателя. Типичная зависимость крутящего момента от скорости асинхронного двигателя при управлении от преобразователя частоты изображена на иллюстрации далее.



Получается, что крутящий момент остается постоянным до базовой частоты и выше этой частоты он падает (ослабление поля). Поскольку выходная мощность пропорциональна крутящему моменту, умноженному на скорость, она растет линейно до базовой частоты, а выше этой частоты остается постоянной. Это показано на графике внизу.



За последние годы значительно увеличилось количество применений электродвигателей с регулированием скорости вращения преобразователем частоты. Это объясняется **многими преимуществами** таких применений:

- **Со стороны управления** – управление может быть установлено удаленно в подходящем месте, оставляя в зоне обработки только электродвигатель – в противоположность гидравлическим и механическим системам регулирования скорости.

- **Снижение затрат** – прямой запуск электродвигателя вызывает броски тока, что может навредить электродвигателю и другому электрическому оборудованию в связанной электрической системе. Преобразователь частоты обеспечивает мягкий запуск электродвигателя, и как результат уменьшение затрат на обслуживание оборудования.

- **Увеличение производительности** – промышленные системы часто делаются «с запасом» из-за ожидания увеличения производительности в будущем. Преобразователи частоты позволяют регулировать рабочую скорость в зависимости от оборудования и производственных потребностей.

- **Энергоэффективность** – общий КПД системы зависит не только от используемого электродвигателя, но и от используемого способа управления. Преобразователи частоты обычно имеют высокий КПД, достигающий 97% и выше. Асинхронные электродвигатели также имеют высокий уровень КПД, достигающий 95% и выше в больших силовых электрических машинах, работающих в номинальных режимах.

- **Универсальность** – статические преобразователи частоты используются как для применений с постоянным моментом нагрузки, так и с переменным. В применениях с переменным моментом (низкий крутящий момент на низких скоростях) напряжение на зажимах электродвигателя уменьшается. В применениях с постоянным моментом (или постоянной мощностью) улучшение эффективности системы происходит благодаря возможности плавной регулировки скорости, без необходимости использования нескольких электродвигателей и механических систем для изменения скорости (например, шкивы и шестерни), которые вводят дополнительные потери.

- **Высокое качество** – точный контроль скорости с преобразователем частоты оптимизирует процесс, что обеспечивает более высокое качество конечного продукта.

4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

4.1 Общие

Для регулирования скорости электродвигателя используется ШИМ напряжение на выходе преобразователя частоты. Преобразователи работают в качестве интерфейса между источником энергии (линии электропитания) и асинхронным электродвигателем.

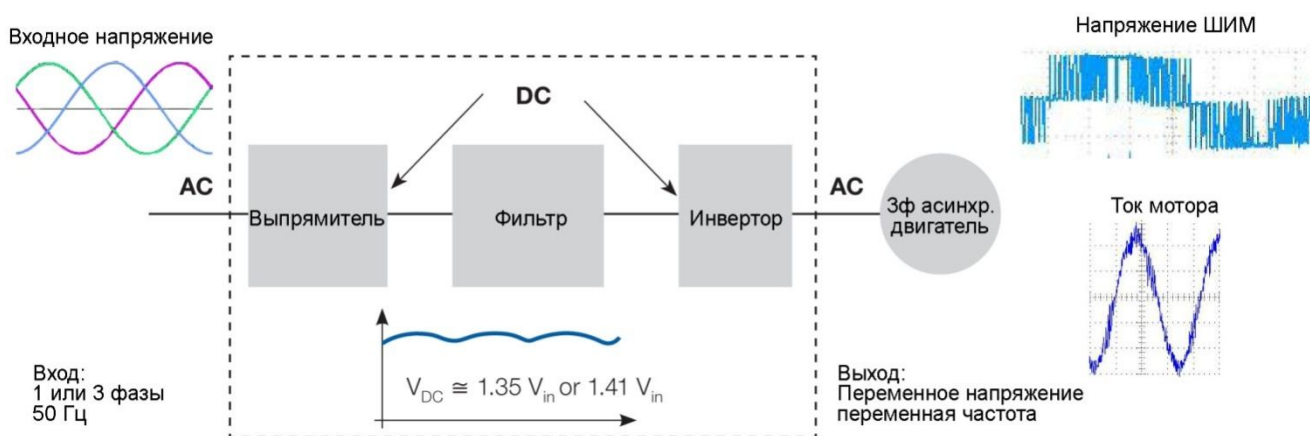
Для того чтобы получить выходной сигнал требуемого напряжения и частоты, входной сигнал должен пройти три этапа:

Диодный мост – Выпрямление входного напряжения переменного тока постоянной амплитуды и частоты.

Звено постоянного тока или фильтр – регулирование/сглаживание выпрямленного напряжения с использованием конденсаторов.

Инвертор на IGBT транзисторах – преобразование напряжения, после звена постоянного тока в переменное напряжение, переменной амплитуды и частоты.

Следующая диаграмма показывает три основных звена преобразователя частоты:



Внимание:

В условиях малых нагрузок (или на холостом ходу) напряжение звена постоянного тока стабилизируется на уровне $\sqrt{2}V_{пит} \cong 1,41V_{пит}$. Однако при полной нагрузке напряжение звена постоянного тока снижается до отметки $3/\pi\sqrt{2}V_{пит} \cong 1,35V_{пит}$.

Далее представлены критерии, предъявляемые к системе изоляции двигателей WEG, предназначенных для работы от преобразователей частоты. Рассмотрим самый высокий из них ($1,41V_{пит}$), который является наиболее важным для двигателя.

4.2 Типы управления

Есть два базовых типа управления: скалярное управление (без обратной связи) и векторное управление (с или без обратной связи).

Скалярное управление основано на оригинальной концепции преобразователей частоты: сигнал определенного соотношения напряжение / частота подается на клеммы электродвигателя и это соотношение сохраняется постоянным во всем диапазоне частот, для того чтобы сохранить постоян-

ным поток намагничивания электродвигателя. Скалярное управление обычно используется, когда нет необходимости быстрого реагирования на изменения задания крутящего момента и скорости, и особенно интересно, когда одним преобразователем регулируется скорость вращения нескольких подключенных к нему электродвигателей.

Управление производится без обратной связи, и точность поддержания скорости является функцией скольжения двигателя, которое зависит от нагрузки, так как частота накладывается на обмотке статора. Для того, чтобы улучшить производительность двигателя на низких скоростях, некоторые привода используют специальные функции, такие как компенсация скольжения (ослабление изменения скорости как функции нагрузки) и повышение крутящего момента (увеличение коэффициента V / F для компенсации падения напряжения на статоре), так что крутящий момент мотора поддерживается постоянным. Это является наиболее широко используемым типом управления благодаря своей простоте, а также тому, что большинство приложений не требуют высокой точности или быстрого изменения скорости.

Векторное управление обеспечивает высокие быстродействие и точность управления скоростью электродвигателя и крутящего момента. По существу ток двигателя разделяют на два вектора, один из них производит поток намагничивания, а другой образует крутящий момент, каждый из которых регулируется отдельно. Векторное управление может быть с разомкнутым контуром (без датчиков обратной связи) или с замкнутым контуром (с датчиками обратной связи).

Обратная связь по скорости - датчик скорости (например, инкрементальный энкодер), устанавливается на электродвигателе. Данный режим обеспечивает высокую точность управления, как крутящим моментом, так и скоростью двигателя даже при очень низких (и нулевой) скоростях.

Бездатчиковое управление - проще, чем регулирование с замкнутым контуром, но его действие ограничено особенно на очень низких скоростях.

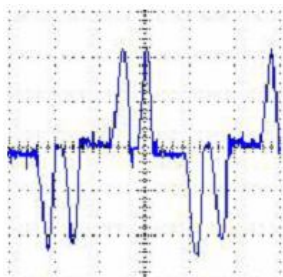
На более высоких скоростях данный режим практически так же хорош, как и векторное управление с обратной связью.

Основное различие между этими двумя типами управления заключается в том что, что скалярное управление учитывает только величины мгновенных электрических величин (магнитного потока, тока и напряжения), приложенных к статору, с уравнениями на основе эквивалентной электрической цепи электродвигателя, то есть уравнениями стационарного состояния. С другой стороны, при векторном управлении рассчитываются мгновенные электрические величины, влияющие на потокосцепление ротора в качестве векторов и его уравнения основываются на пространственной динамической модели двигателя. Асинхронный двигатель при векторном управлении рассматривается как двигатель постоянного тока, с отдельно управляемыми моментом и потоком.

5 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ И ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

5.1 Гармоники

Для сети переменного тока, система преобразователь частоты + двигатель является нелинейной нагрузкой, ток которой включает гармоники (компоненты частот, накладываемые на частоту линии электропередачи). Характеристики гармоник, обычно получаемых от выпрямителя, считаются выражением $h = pr \pm 1$ на стороне переменного тока, то есть на линии электропередачи (p - число импульсов инвертора и $p = 1, 2, 3$). Таким образом, в случае с 6-ти диодным выпрямительным мостом (6 импульсов), наиболее выраженными генерируемыми гармониками будут 5-я и 7-я. Их величины могут варьироваться от 10% до 40% от основной компоненты, в зависимости от сопротивления линии электропередач. В случае 12-ти пульсного выпрямительного моста (12 диодов), наиболее вредными генерируемыми гармониками будут 11-я и 13-я. Чем выше порядок гармоники, тем ниже ее амплитуда, так что высшие гармоники могут быть отфильтрованы более легко. Как и большинство производителей преобразователей частоты, WEG производит свои низковольтные стандартные преобразователи с 6-импульсными выпрямителями.



Энергетическую систему гармонических искажений можно количественно оценить коэффициентом THD (Total Harmonic Distortion - коэффициент нелинейных искажений), который получает информацию от изготовителя преобразователя и определяется как:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1}\right)^2}$$

Где:

A_h – среднеквадратичное значение нефундаментальных гармонических составляющих
 A_1 – значение основной компоненты тока
 Форма сигнала показанного выше - входной измеряемый ток 6-импульсного ШИМ преобразователя частоты, подключенного к энергосистеме с низким импедансом.

5.1.1 Нормативные соглашения о гармониках

Руководство по эксплуатации NEMA для регулируемого электропривода ссылается на IEEE Std.519 (1992), который рекомендует максимальный THD уровень для мощных систем напряжением $\leq 69\text{kV}$ как указано в следующей таблице.

Гармоники напряжения	
Четная компонента	3%
Нечетная компонента	3%
THD	5%

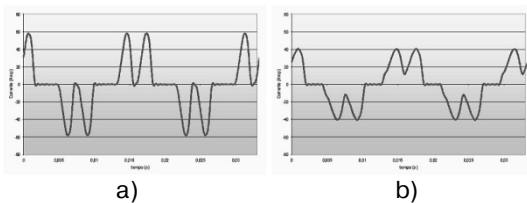
5.2 Сетевой дроссель / дроссель звена постоянного тока

Токи гармоник, которые циркулируют через сопротивления линии электропередачи и зависят от значения входного/выходного сопротивления выпрямителя, вызывают гармонические составляющие падения напряжения, которые искажают напряжение питания преобразователя и других нагрузок, подключенных к этой линии. Искажения гармонического тока и напряжения могут увеличить электрические потери в установке, снижение коэффициента мощности и перегрев компонентов, таких как кабели, трансформаторы, батареи конденсаторов, двигатели и т.д.

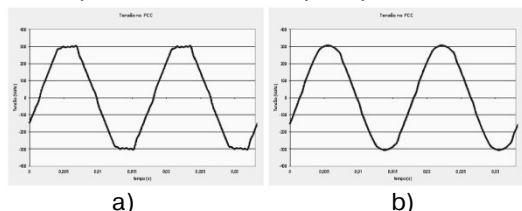
Добавление сетевого дросселя и / или дросселя шины постоянного тока уменьшает содержание гармоник тока и увеличивает коэффициент мощности. Дроссель шины постоянного тока имеет то преимущество, что не создает падения напряжения на двигателе, но в зависимости от комбинации значения его сопротивления с сопротивлением линии электропередачи и значения емкости промежуточного контура могут появиться нежелательные резонансы в общей системе.

С другой стороны, линейный реактор уменьшает среднее напряжение промежуточной цепи, но более эффективно ослабляет влияние гармоник напряжения питания. Кроме того, он продлевает срок службы полупроводников и промежуточной батареи конденсаторов, в результате уменьшается, как среднеквадратичный ток выпрямительных диодов, так и пульсации тока через конденсаторы.

Входной ток преобразователя



Напряжение на входе преобразователя



Форма тока и напряжения с (b) и без (a) сетевого дросселя. Видно, что сетевой дроссель смягчает пики, тем самым уменьшая содержание гармоник и действующее значение входного тока. Кроме того уменьшаются искажения формы сигнала напряжения питания.

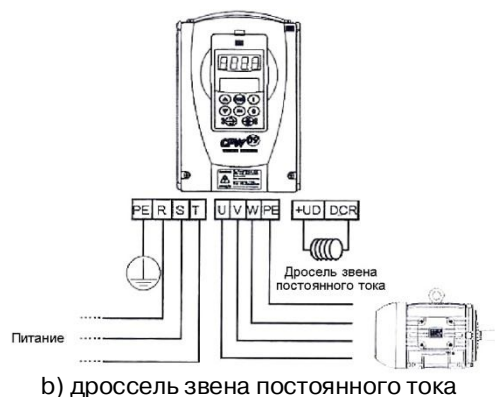
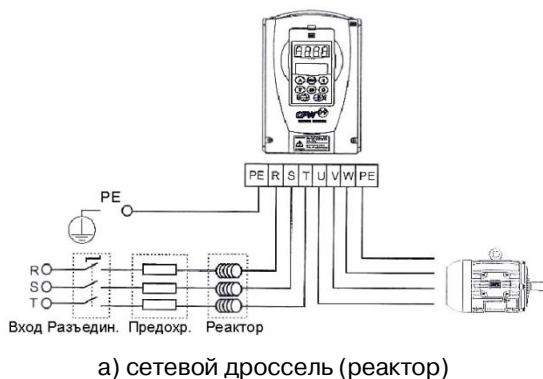
Минимальное сопротивление линии электропитания, которое приводит к падению напряжения от 1 до 2%, в зависимости от типоразмера преобразователя, увеличивает срок службы преобразователя.

Как правило, рекомендуется добавлять сопротивление сетевого дросселя к существующим сопротивлениям источника электропитания (в том числе трансформаторов и кабелей), так что общее падение напряжения составляет от 2 до 4%. Эта практика рассматривается как хороший компромисс между падением напряжения на электродвигателе, улучшением коэффициента мощности и уменьшения искажений гармонических составляющих выходного тока.

Значение индуктивности сетевого дросселя, необходимое для желаемого уровня падения напряжения может быть получено следующим образом:

$$L = \frac{(\text{Падение напряжения})\% \cdot V_{\text{пит}}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f_{\text{пит}} I_{\text{ном}}} \text{ [H]}$$

Ниже приведены схемы установки сетевого дросселя (a) и дросселя звена постоянного тока (b).

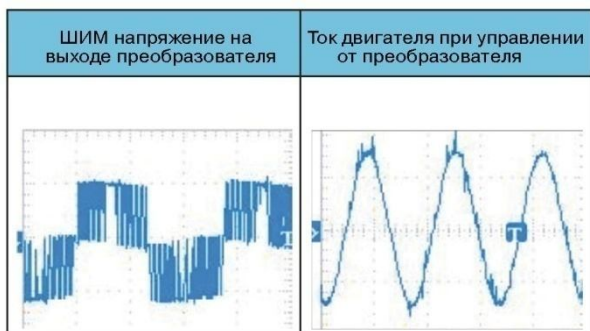


6 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ И МОТОРОМ

6.1 Влияние гармоник на характеристики электродвигателя

Асинхронный двигатель, работающий от преобразователя частоты с ШИМ, подвергается влиянию гармоник напряжения с частотой выше основной частоты питания. В зависимости от типа используемой ШИМ, частоты переключения и других особенностей управления, эффективность электродвигателя может снижаться, а потери, температура, шум и уровень вибрации повышаются.

Кроме вышеперечисленных, могут проявляться и другие эффекты при питании асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты. Диэлектрический стресс системы изоляции и напряжения вала вместе с потенциально опасными подшипниковыми токами являются хорошо известными побочными эффектами. Хотя они не являются производными только гармоник, но по другим причинам, которые в скором времени будут рассмотрены, они являются важными эффектами и не следует ими пренебрегать. Формы тока и напряжения, при питании ШИМ напряжением показаны на рисунке ниже.



Электродвигатель, питаемый от преобразователя частоты, испытывает пульсации (ШИМ) напряжения и практически синусоидального тока, так что гармоники напряжения обычно более высокой амплитуды, чем гармоники тока.

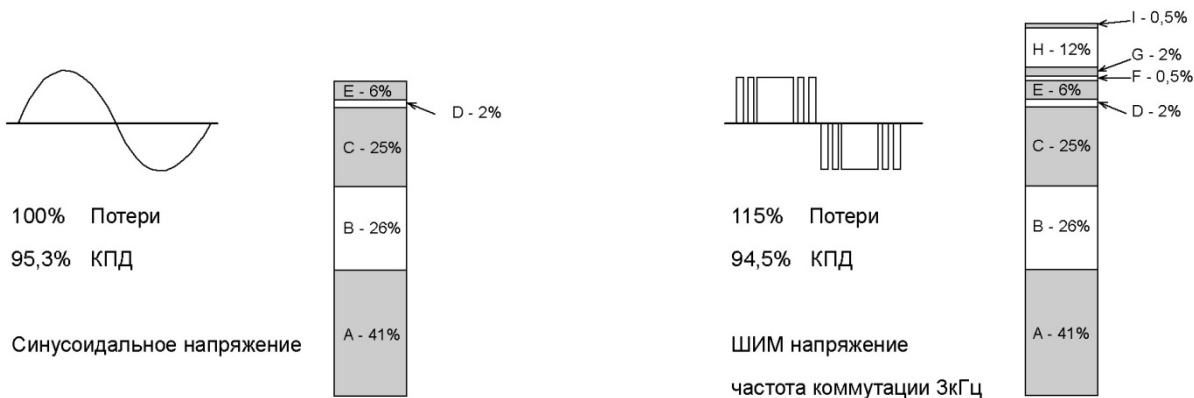
Существуют следующие решения для уменьшения гармоник, генерируемых преобразователем частоты:

Метод уменьшения гармоник	Характеристики решения
Установка выходных пассивных фильтров (L, LC, dV/dt)	Увеличение стоимости установки
	Ограничения для векторного управления
	Падение напряжения (уменьшение мощности мотора)
Использование многоуровневого преобразователя	Увеличение стоимости
	Уменьшение надежности преобразователя
	Усложнение управления
Улучшение качества ШИМ (оптимизация временной диаграммы)	Пространственно Векторная Модуляция (SVM)*
	Не увеличение стоимости
	Улучшение контроля напряжения
	Выше эффективность системы (преобразователь + мотор)
Увеличение несущей частоты	Уменьшение эффективности преобразователя (увеличение потерь переключения)
	Увеличение токов утечки

6.1.1 Нормативные соглашения о выходных гармониках преобразователей

Не существует международной стандартизации определения максимально допустимых значений гармонических искажений напряжения и тока. Тем не менее, международные стандарты учитывают увеличение потерь электродвигателя из-за несинусоидального питания.

Стандарт IEC 60034-17 представляет собой пример увеличения потерь электродвигателя за счет питания ШИМ напряжением. Двигатель: IEC 315 габарит, номинальные значения крутящего момента и скорости.



Потери при питании синусоидальным напряжением:

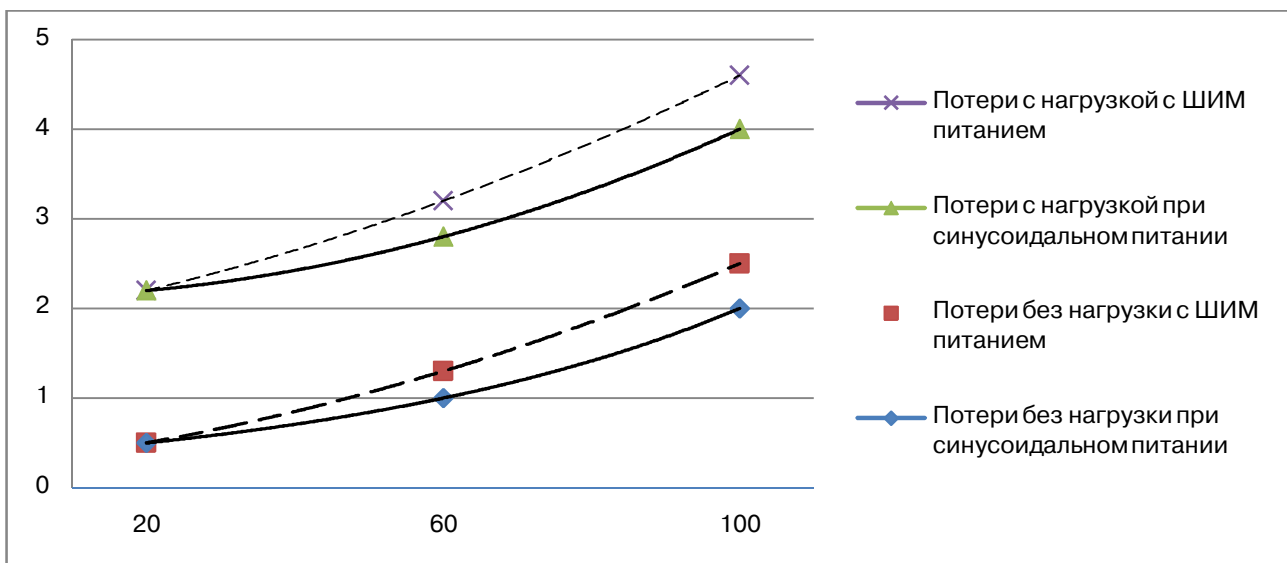
- A – Потери в обмотках статора
- B – Потери в обмотке ротора
- C – Потери в стали
- D – Дополнительные потери нагрузки
- E – Потери на трение

Потери из-за гармоник:

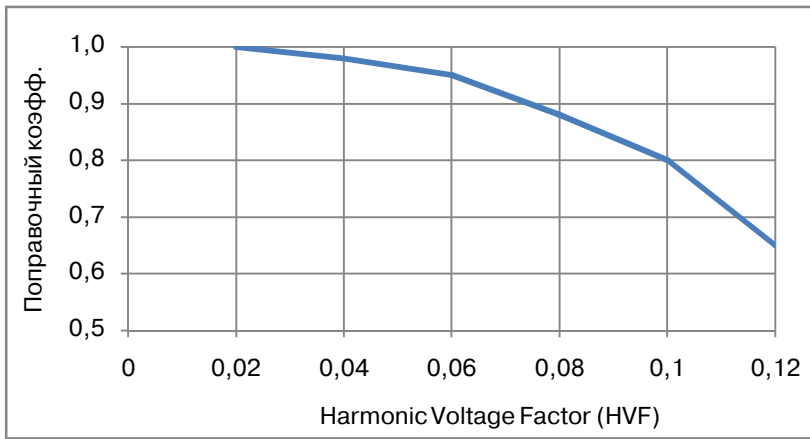
- F – Потери в обмотках статора
- J – Потери в обмотке ротора
- H – Потери в стали
- I – Дополнительные потери нагрузки
- J – Коммутационные потери

ПРИМЕЧАНИЕ: Работа двигателя ИЕС 315 габарита при номинальных значениях момента нагрузки и скорости.

ИЕС 60034-25 иллюстрирует увеличение потерь двигателя из-за ШИМ питания следующими кривыми:



NEMA MG1 - Часть 30 считает поправочный коэффициент (уменьшения крутящего момента), чтобы избежать чрезмерного перегрева двигателя, который питается от преобразователя, компенсируя циркуляцию гармонических токов, что возникают за счет содержания гармоник напряжения при ШИМ:



$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2}$$

Где:

n – порядок нечетной гармоники, не считая тех, которые делятся на три;
 V_n – относительная величина частоты напряжения n-ой гармоники.

6.2 Об энергоэффективности

Отсутствие международных стандартов, определяющих процедуры испытания для оценки энергоэффективности системы (двигатель + преобразователь) позволяет проводить такие испытания различными и не спорными способами. Таким образом, полученные результаты не должны влиять на одобрение (или нет) характеристик двигателя, за исключением случаев обоюдного согласия между заказчиком и изготовителем. Как показывает практика, эти соображения верны, о чем указывается ниже.

- Асинхронный электродвигатель, питаемый ШИМ напряжением, имеет более низкую эффективность, чем при питании чисто синусоидальным напряжением, в связи с увеличением потерь, вызванных гармониками;

- В любом случае, при работе асинхронных электродвигателей от частотных преобразователей, Должна оцениваться эффективность системы в целом, а не только электродвигателя;

- Каждый случай должен быть должным образом проанализированы с учетом характеристик, как двигателя, так и преобразователя, учитывая параметры: рабочая частота, частота переключения, диапазон скоростей, нагрузка и мощность двигателя, суммарный коэффициент гармонических искажений и т.д.

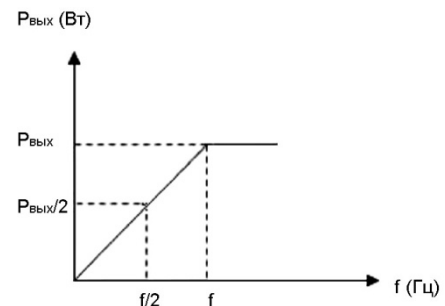
- Тип измерительных приборов чрезвычайно важен для правильной оценки электрических величин на системах с ШИМ напряжением. Правильные среднеквадратичные значения должны быть использованы для того, чтобы обеспечить верные измерения мощности;

- Увеличение частоты коммутации увеличивает КПД двигателя и снижает КПД инвертора (из-за увеличения потерь на переключениях силовых ключей).

- При питании от преобразователя частоты энергоэффективные электродвигатели сохраняют свой КПД выше, по сравнению с КПД стандартных двигателей.

6.2.1 Влияние изменения скорости на КПД электродвигателей

Эффект влияния изменения скорости на эффективность двигателя можно понять из анализа изменения выходной мощности электродвигателя питаемого от преобразователя частоты в зависимости от его скорости.



Предположим, например, что базовая частота для вышеописанного примера равна 60Гц:

$$P_{60\text{Гц}} = P_u$$

$$P_{30\text{Гц}} = \frac{P_u}{60} = 0,5P_u$$

Учитывая, что потери в двигателе, складываются из тепловых потерь (P_t) и потерь в железе (P_j) и предполагая, что тепловые потери преобладают, то КПД двигателя уменьшается на низких скоростях, где выходная мощность двигателя снижается и, несмотря на незначительное снижение потерь в железе (зависит от частоты), тепловые потери (пропорциональные квадрату тока) сохраняются почти постоянными при постоянной нагрузке, так что, в конце концов нет значительного изменения общих потерь.

Рассмотрим следующее уравнение для пояснения вышесказанного. Определим эффективность как:

$$\eta(\%) = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВЫХ}} + \sum \text{потерь}}$$

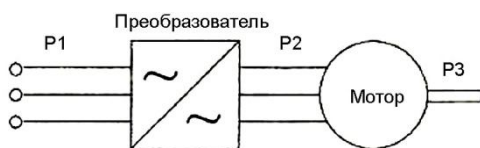
И в соответствии с описанным выше:

$$\sum \text{потерь} \cong P_j + P_l \quad P_j > P_l$$

Тогда при снижении скорости получим:

$$\downarrow P_l + P_j \cong \text{const} (P_j \gg P_l) \Rightarrow \sum \text{потерь} \cong \text{const} \left. \begin{array}{l} \downarrow \\ \downarrow P_{\text{ВЫХ}} \end{array} \right\} \eta\% \downarrow$$

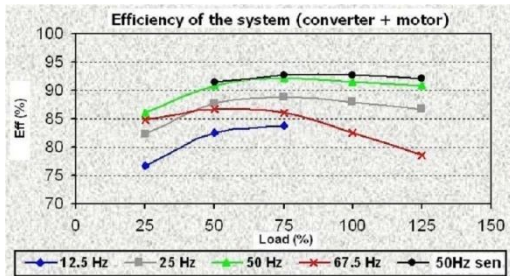
6.2.1.1 Числовой пример



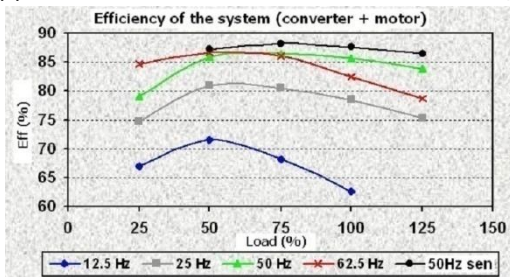
$$\left. \begin{array}{l} \eta_{\text{ПЧ}} = P_2/P_1 \\ \eta_{\text{МОТ}} = P_3/P_2 \end{array} \right\} \eta_{\text{СИСТ}} = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}} = P_3/P_1 = \eta_{\text{ПЧ}} \cdot \eta_{\text{МОТ}}$$

Некоторые практические значения, полученные для стандартных двигателей методом измерения входных/выходных параметров, показаны ниже:

Двигатель 55 кВт – 6 полюсов – 400 В – 50 Гц



Двигатель 11 кВт – 4 полюса – 400 В – 50 Гц



6.2.2 Нормативные соглашения о КПД моторов, управляемых от ПЧ

НEMA MG1 Часть 30 – КПД электродвигателя значительно снизится, если питающее его напряжение содержит гармоники. Наличие гармоник увеличивает электрические потери, которые, в свою очередь, снижают КПД. Увеличение потерь приведет к увеличению температуры двигателя, что еще больше снижает его КПД.

НEMA MG1 Часть 31 - Тесты производительности, когда они требуются, должны проводиться с источником синусоидального напряжения питания, если не указано иное по взаимному согласованию между изготовителем и потребителем.

НEMA Руководство по применению для систем электропривода переменного тока – общий КПД системы на основе общих потерь управления, двигателя и любого дополнительного оборудования. (...) КПД двигателя при работе от преобразователя немного меньше, чем при работе от синусоидального напряжения. Общий КПД системы часто повышается при использовании регулируемого электропривода. Традиционные методы изменения скорости, такие как зубчатая или ременная передачи вводят дополнительные потери, которые снижают КПД.

IEC 60034-17 - Качественные характеристики и эксплуатационные данные для электроприводов с асинхронными электродвигателями, управляемыми от преобразователей частоты находятся под влиянием всей системы, включая систему питания, преобразователь, асинхронный двигатель, механические соединения и управляющее оборудование. Каждый из этих компонентов существует в многочисленных технических вариантах. Любые значения, указанные в этой технической спецификации, таким образом, являются лишь ориентировочными. (...) Не существует простого метода для расчета дополнительных потерь и не может быть сделано общее заявление об их стоимости. Их зависимость от различных физических величин является очень сложной. Также необходимо учитывать большое разнообразие, как преобразователей, так и двигателей.

IEC 60034-25 - рекомендуемые методы для определения КПД двигателя приведены в МЭК 60034-2 (метод суммирования потерь для двигателей > 150 кВт и метод измерения входа-выхода для двигателей мощностью < 150 кВт). Потери холостого хода (в том числе дополнительные потери), должны оцениваться с той же последовательностью и частотой импульсов, что будет генерировать преобразователь при номинальной нагрузке. Определение общей эффективности системы (двигатель + инвертор) посредством измерений входа-выхода для двигателей > 150 кВт также применимо по согласованию между изготовителем и потребителем. В таком случае КПД электродвигателя не должно рассчитываться отдельно.

6.3 Влияние преобразователя на повышение температуры обмоток

Асинхронные двигатели могут больше нагреваться при питании их от преобразователя частоты, чем при питании от источника синусоидального напряжения (от сети). Большой нагрев является результатом увеличения потерь в электродвигателе из-за влияния высокочастотных составляющих ШИМ напряжения и часто уменьшается теплоотдача как результат изменения скорости (чем меньше скорость вращения двигателя – тем меньше охлаждающий воздушный поток).

Гармонические искажения напряжения способствуют увеличению потерь в двигателе, как только возникают незначительные гистерезисные петли в стали статора, увеличивается эффективное магнитное насыщение сердечника, и повышаются высокочастотные гармонические токи, которые вызывают дополнительные тепловые потери.

Однако, эти высокочастотные составляющие не участвуют в создании крутящего момента в двигателе, так как они не увеличивают магнитный поток в воздушном зазоре, который вращается с синхронной скоростью. Продолжительная работа на низких скоростях приводит к снижению самовентиляции корпуса двигателя, следовательно, ухудшается охлаждение двигателя и, таким образом, повышается установившаяся температура.

При работе с преобразователем частоты должны быть учтены эффекты, упомянутые выше. Существуют основные следующие решения, чтобы избежать чрезмерного перегрева двигателя при работе от преобразователя частоты:

- Снижение крутящего момента (увеличение габарита самовентилируемого электродвигателя);
- Использование независимой системы охлаждения (принудительная вентиляция);
- Использование "Решения Оптимального Потока" (исключительно для приложений, использующих преобразователи и двигатели WEG).

6.4 Критерии, касающиеся повышения температуры двигателей WEG при работе от преобразователя частоты

6.4.1 Падение момента

Для того чтобы сохранить увеличение температуры двигателей WEG в допустимых пределах при питании от преобразователя частоты, должны соблюдаться следующие пределы нагрузки (отслеживание состояния обмоток двигателя и магнитного потока).

ВНИМАНИЕ: Применения двигателей для использования во взрывоопасных зонах должны оцениваться особенно тщательно - в этом случае, пожалуйста, свяжитесь с WEG.

6.4.1.1 NEMA рынок

Электродвигатели W21 и W22 (высокий класс КПД) с крыльчаткой					
Корпус	Постоянный момент	Переменный момент	Постоянная мощность	Привод	Комментарии
143 – 587 (***)	12:1	1000:1	60 – 120Гц	Любой	Постоянный поток
	100:1(*)	—	60 – 120Гц	WEG (**)	Оптимальный поток
587 (****)	4:1	1000:1	60 – 120Гц	Любой	Постоянный поток
	10:1	—	60 – 120Гц	WEG (**)	Оптимальный поток
Электродвигатели W21 и W22 (NEMA Премиум класс КПД) с крыльчаткой					
Корпус	Постоянный момент	Переменный момент	Постоянная мощность	Привод	Комментарии
143 – 587 (***)	20:1	1000:1	60 – 120Гц	Любой	Постоянный поток
	1000:1(*)	—	60 – 120Гц	WEG (**)	Оптимальный поток
587 (****)	6:1	1000:1	60 – 120Гц	Любой	Постоянный поток
	12:1	—	60 – 120Гц	WEG (**)	Оптимальный поток

(*) Необходимые характеристики двигателя зависят от правильной настройки привода - обращайтесь в WEG.

(**) Привод WEG CFW-09 версии 2.40 или выше, работает без датчиков (без обратной связи) в векторном режиме.

(***) Двигатели с номинальной мощностью ≤ 250 л.с. Критерий так же справедлив и для двигателей типоразмеров 447 и 449.

(****) Двигатели с номинальной мощностью > 250 л.с. Критерий справедлив и для двигателей типоразмеров 447 и 449.

ПРИМЕЧАНИЕ:

Диапазоны скоростей указанные выше, связаны исключительно с тепловой возможностью. Регулирование скорости будет зависеть от векторного режима работы и правильной настройки.

W21 и двигатели WEG NEMA всех типоразмеров с улучшенным КПД также могут охлаждаться независимым обдувом, что указывается при запросе. В таком случае двигатель будет подходить для применения в механизмах с переменным и постоянным крутящим моментом в диапазоне 1000:1 с любой скоростью.

W21 и двигатели WEG NEMA с улучшенным КПД соответствуют требованиям к максимально безопасной скорости работы, разработаны в NEMA MG1 часть 30 и 31 (2003).

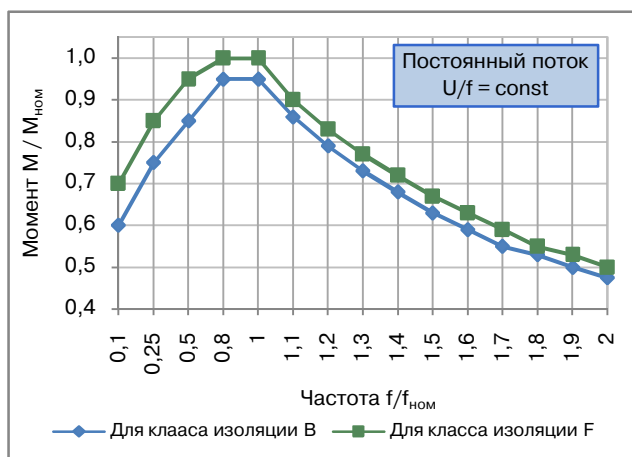
Зависимости, установленные выше, описывают диапазоны скоростей. Предположим, например, что 60 Гц базовая частота, тогда действительны следующие эквивалентности:

Глубина регулирования	Диапазон частот
4:1	15 – 60Гц
10:1	6 – 60Гц
12:1	5 – 60Гц
20:1	3 – 60Гц
100:1	0,6 – 60Гц
1000:1	0,06 – 60Гц

6.4.1.2 ИЕС рынок

Условие постоянного магнитного потока:

Рассматриваются закрытые самообдуваемые двигатели класса КПД IE1 или более высокого класса эффективности.



Условие оптимального потока:

Рассматриваются закрытые самообдуваемые двигатели класса КПД IE2 или более высокого класса эффективности.

Запатентованное решение WEG "Оптимальный поток" было разработано в целях создания асинхронных двигателей WEG, способных работать на низких скоростях с постоянным моментом, сохраняя приемлемый уровень повышения температуры без необходимости завышения габаритных размеров двигателя или применения независимого вентилятора охлаждения.

Оно основано на непрерывной минимизации потерь в двигателе (источников тепла) посредством оптимизации его магнитного потока, этот параметр контролируется в преобразователях частоты серии CFW09.

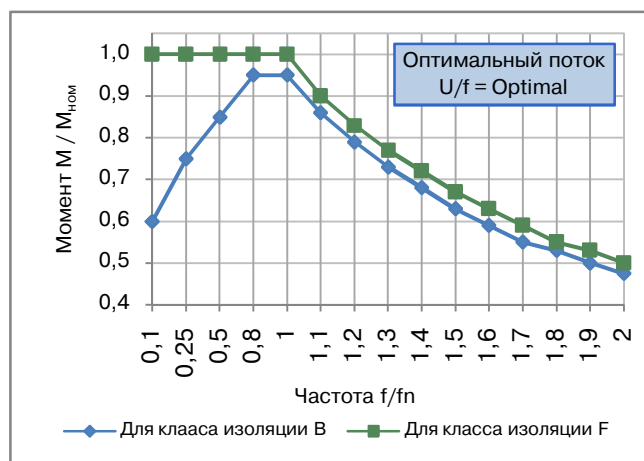
Из исследования состава общих потерь в двигателе и их связь с частотой питающего напряжения, магнитным потоком и током, а также влияния системы вентиляции на повышение температуры двигателя, было установлено оптимальное значение потока для

каждой частоты, обеспечивая непрерывную минимизацию общих потерь в двигателе во всем диапазоне скоростей.

Полученное решение реализовано в CFW09. Для того, чтобы привод мог автоматически создавать оптимальный поток двигателя, достаточно произвести правильно простую настройку преобразователя. Потери в стали двигателя сильно зависят от частоты. Поскольку рабочая частота изменяется вниз, потери в стали постепенно уменьшаются. Интересно, что на низкой скорости необходимо увеличение магнитной индукции (плотности потока) двигателя, для того чтобы крутящий момент мог поддерживаться постоянным с меньшим током, который приводит к уменьшению тепловых потерь. При уменьшении скорости, менее интенсивное уменьшение напряжения пропорционально снижению частоты, приводит к оптимальному соотношению U/f , которое сводит к минимуму потери в двигателе в целом. Считается, что основными являются тепловые потери в обмотках двигателя.

Это решение разработано для применений с низкими скоростями вращения с постоянным моментом, и ни в коем случае не должно использоваться в применениях с переменным моментом или скоростях выше базовой частоты двигателя. Кроме того, решение WEG "Оптимальный поток" применимо в том случае если:

- Двигатель питается от преобразователя WEG CFW09 версии 2.40 или выше;
- Используется векторное управление без датчика обратной связи;



6.4.2 Пусковой момент

В соответствии с NEMA MG1 частей 30 и 31, двигатель должен обеспечивать пусковой момент, по меньшей мере, 140% от номинального момента потребляя не более 150% от номинального тока. Электродвигатели WEG при питании от преобразователей частоты соответствуют таким рекомендациям.

6.4.3 Критический момент

При скорости выше базовой, напряжение двигателя должно оставаться постоянным для постоянной мощности, как уже указано ранее. NEMA MG1 Часть 31 предписывает, что критический момент на любой частоте вращения в пределах определенного диапазона частот должен быть не менее 150% от номинального крутящего момента на этой частоте, при номинальном напряжении для этой частоты. Двигатели WEG при работе от преобразователя частоты удовлетворяют этому критерию на частотах до 90 Гц. Максимально возможный крутящий момент двигателя (опрокидывающий момент) ограничивает максимальную рабочую скорость, на которой возможна работа с постоянной мощностью. Придерживаясь рекомендаций NEMA, можно приблизительно найти этот предел по следующему выражению:

$$n_{max} = \frac{2}{3} \left(\frac{M_{max}}{M_{ном}} \right) n_{ном}$$

6.5 Влияние преобразователя на систему изоляции

Эволюция силовых полупроводников привела к созданию не только более эффективных, но и более быстродействующих электронных ключей. Высокая частота коммутации IGBT-транзисторов, используемых в современных преобразователях частоты, вызывает некоторые нежелательные эффекты, на клеммах электродвигателя подключенного к преобразователю частоты, такие как увеличение электромагнитного излучения, появление пиков напряжения, большое отношение dV/dt (производная по времени от напряжения, то есть скорость нарастания электрического потенциала). В зависимости от характеристик управления (сопротивления, емкости, управляющее напряжение и т.д.) и используемого ШИМ, при питании асинхронного двигателя с КЗ ротором от преобразователя частоты, импульсы напряжения в сочетании с сопротивлением, как кабеля, так и двигателя могут привести к периодическим перенапряжениям на клеммах двигателя. Которые могут ухудшить систему изоляции двигателя и, следовательно, уменьшить срок службы двигателя.

Кабель и двигатель можно считать резонансным контуром, который возбуждается прямоугольными импульсами от преобразователя. Если значения R, L и C таковы, что пиковое напряжение превышает напряжение питания ($V_{DC} \cong 1,41 V_{пит}$), то могут наблюдаться так называемые "броски" напряжения. Такие броски влияют на особенности межвитковой изоляции обмотки и зависят от нескольких факторов:

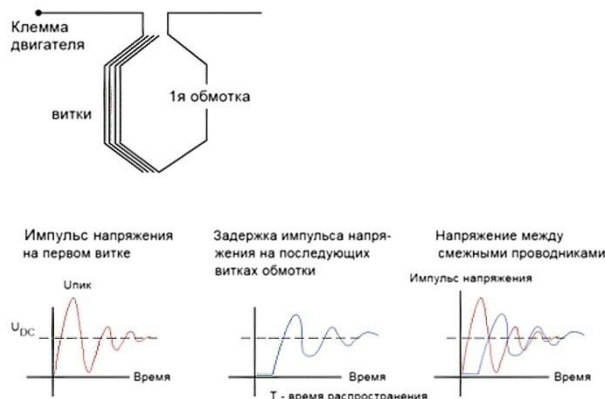
- времени нарастания импульса напряжения
- длины и типа кабеля
- минимального времени между соседними импульсами
- частоты переключений (несущей частоты)
- управление несколькими электродвигателями

6.5.1 Время нарастания

ШИМ напряжению требуется некоторое время для нарастания от минимального до максимального значения. Этот период времени часто называют "время нарастания". В связи с большой скоростью переключения каскада инвертора, нарастание напряжения происходит слишком быстро. С развитием силовой электроники время нарастания напряжения становится все меньше и меньше.

Двигатели при работе от преобразователя частоты подвергаются воздействию очень высоких значений dV/dt , так что первый виток первой обмотки одной фазы подвергается воздействию высокого уровня напряжения.

Поэтому преобразователь частоты может значительно увеличить воздействие напряжения на обмотку электродвигателя, хотя благодаря индуктивным и емкостным характеристикам обмотки, импульсы затухают на последующих витках.

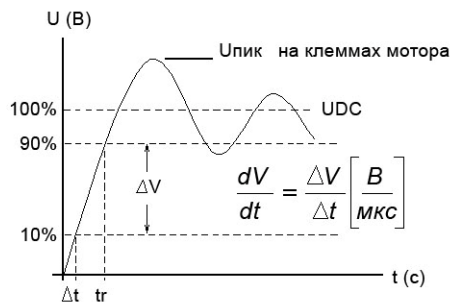


Таким образом, время нарастания (t_r) имеет прямое влияние на срок службы изоляции, потому что чем быстрее нарастает фронт импульса напряжения, тем больше соотношение dV/dt на первой катушке и выше уровень напряжения между витками, в результате чего система изоляции быстрее изнашивается. Таким образом, система изоляции двигателя должна иметь улучшенные диэлектрические характеристики для того, чтобы выдержать повышенный уровень напряжения от преобразователей частоты.

6.5.1.1 Нормативные соглашения о времени нарастания

Определения времени нарастания (t_r) в соответствии с NEMA и IEC стандартами отличаются, как показано ниже, что приводит к расхождениям в интерпретации и конфликтам между производителями и пользователями электродвигателей и преобразователей.

NEMA MG1 Part 30



t_r : Время, необходимое для нарастания напряжения от 10% до 90% от значения уровня напряжения звена постоянного тока ($\cong 1,41U_{ном}$)

NEMA описание dV/dt

Предположим, что номинальное напряжение мотора 460В.

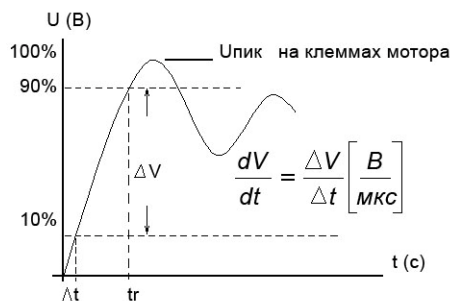
$$V_{DC} = 1.41 * 460 = 648.6В$$

$$\Delta V = 0.8 * 648.6 = 518.9В$$

Принимая, что время нарастания = 0,1мкс, $\Delta t = 0.1мкс$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{518.9}{0.1} = 5189 \left[\frac{В}{МКС} \right]$$

IEC 60034-25



t_r : Время, необходимое для нарастания напряжения от 10% до 90% от значения пикового напряжения на зажимах мотора.

IEC описание dV/dt

Предположим, что номинальное напряжение мотора 460В с пиковым значением 1200В.

$$\Delta V = 0.8 * 1200 = 960В$$

Принимая, что время нарастания = 0,25мкс,

$$\Delta t = 0.25мкс$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{960}{0.25} = 3840 \left[\frac{В}{МКС} \right]$$

ПРИМЕЧАНИЕ:

Благодаря кабелю, время нарастания на клеммах двигателя выше, чем на клеммах преобразователя. Тем не менее, очень распространенной ошибкой в расчете dV/dt является использование времени нарастания на клеммах преобразователя и пикового напряжения на клеммах двигателя, в результате чего значения dV/dt получаются завышенными. Например, принимая, что $t_r = 0,1$ мкс (типичное значение для преобразователей) в предыдущем случае, то это привело бы к $dV/dt = 9600$ В / мкс!

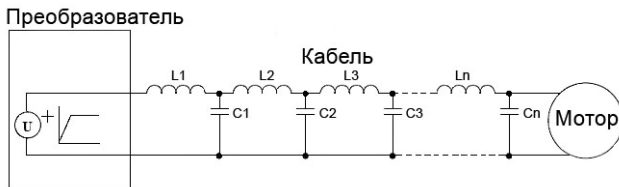
Из-за различий, существующих в описаниях времени нарастания в NEMA и IEC стандартах, часто возникают недоразумения при расчете градиента напряжения (dV/dt).

В соответствии с NEMA критерием напряжение звена постоянного тока ($1.41V_{пит}$) должно быть принято за 100% опорного напряжения для определения времени нарастания и расчета dV/dt . А в соответствии с IEC критерием 100% опорным напряжением должно быть принято пиковое напряжение на клеммах двигателя. Благодаря кабелю, время нарастания, которое рассматривается в IEC критерии, будет обычно выше, чем считается в NEMA критерии (которое является значением, заявленным изготовителем преобразователя). Таким образом, в зависимости от критерия принятого для расчета, получаются различные значения dV/dt , для одной и той же ситуации.

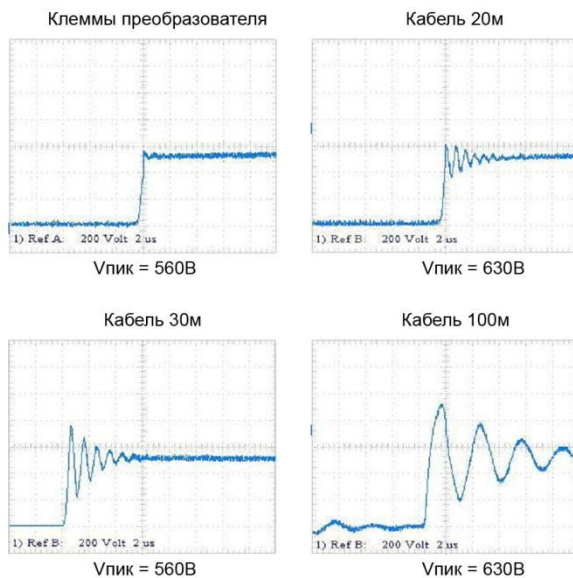
Критерии выбора изоляции для двигателей WEG основаны на NEMA стандарте, для того, чтобы не зависеть от способа установки мотора конечным клиентом. Кроме того, NEMA подходит для рассмотрения только линейного участка кривой для аппроксимации производной ($dV/dt \approx \Delta V / \Delta t$). IEC критерий использует пиковое напряжение на клеммах двигателя, что очень сложно рассчитать или оценить априори. Время нарастания на клеммах двигателя увеличивается благодаря высокочастотному сопротивлению кабеля. Соотношение dV/dt на клеммах двигателя (мягче, чем на клеммах преобразователя) также может быть рассчитано, но оно требует более точного измерения импульсов напряжения на клеммах двигателя и в большинстве случаев это не так легко сделать или даже не возможно, даже с учетом наличия высококвалифицированного персонала и хорошего осциллографа.

6.5.2 Длина кабеля

Наряду с увеличением времени нарастания напряжения, длина кабеля является доминирующим фактором, влияющим на возникновение пиков напряжения на клеммах двигателя, подключенного к преобразователю частоты. Кабель может рассматриваться как линия электропередачи, сопротивление которой распределяется в LC блоках, подключенных последовательно / параллельно. Каждым импульсом, преобразователь отдает энергию в кабель, заряжая реактивные элементы.



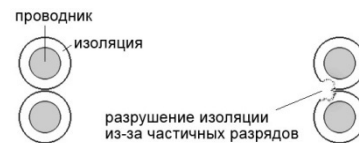
Сигнал, поступающий в двигатель через кабель, частично отражается, вызывая перенапряжение, потому что высокочастотное сопротивление у двигателя больше, чем у кабелей. Чрезмерно длинные кабели увеличивают броски на клеммах двигателя. В современной IGBT системе управления броски начинают наблюдаться уже в кабелях длиной в несколько метров и могут достигать 2-х кратного значения напряжения в шине постоянного тока при длине менее 15 метров. В некоторых случаях, однако, очень длинные кабели (например, свыше 120 метров) могут привести к ситуации, когда перерегулирование не затухает достаточно быстро. В этом случае пики напряжения на клеммах двигателя могут достигать двукратного значения напряжения в звене постоянного тока преобразователя. Такое поведение является функцией структуры ШИМ импульса, времени нарастания и типа кабеля. Измерения напряжения, производимые на клеммах преобразователя (длина кабеля 0 м) и на клеммах двигателя ($V_{ном} = 400В$) с кабелями различной длины представлены на следующем рисунке. Перерегулирования также зависят от типа кабеля, используемого в установке, поэтому формы волны, показанные ниже, являются только иллюстративными.



6.5.2.1 Эффект короны

В зависимости от качества / однородности пропитки пропиточный материал может содержать пустоты (полости), в которых происходит механизм разрушения межвитковой изоляции. Ухудшение состояния изоляции электродвигателя в связи с бросками напряжения происходит посредством частичных разрядов, сложное явление, появляющееся в результате Короны.

Между соседними заряженными проводниками есть относительное напряжение, которое приводит к возникновению электрического поля. Если созданное электрическое поле достаточно высокое (но ниже напряжения пробоя изолирующего материала), нарушается электрическая прочность воздуха. Если имеется достаточное количество энергии, кислород (O_2) ионизируется в озон (O_3), а озон является крайне агрессивным и, воздействуя на органические компоненты системы изоляции, повреждает их. Для этого напряжение на проводниках должно превышать пороговое значение, так называемое "Напряжение начала короны", то есть местную прочность на пробой в воздухе (в пустоте). Напряжение начала короны зависит от конструкции обмотки, типа изоляции, температуры, поверхностных характеристик и влажности.



Влияние частичных разрядов на систему изоляции моторов.



Поврежденная изоляция из-за частичных разрядов

Частичный разряд, низкоэнергетический разряд, который, после длительного воздействия преждевременно ухудшает изоляцию двигателя. Эрозии уменьшают толщину изолирующего материала. Как результат постепенно уменьшаются его диэлектрические свойства, пока его напряжение пробоя не упадет ниже уровня прикладываемого пикового напряжения, и тогда происходит пробой изоляции.

6.5.3 Минимальное время между соседними импульсами

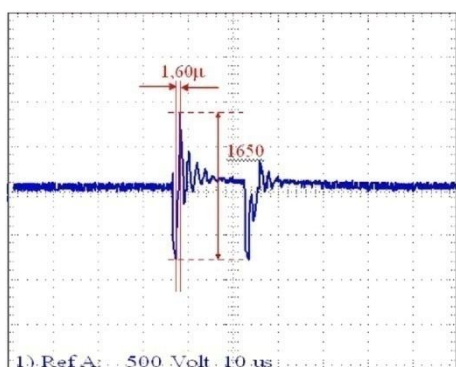
Измерения напряжения, представленные выше, показывают, что существует последовательность пиков кривой напряжения передаваемого преобразователем частоты к клеммам электродвигателя. Этот сигнал распространяется через кабель на определенной скорости. В зависимости от минимального времени между последовательными импульсами формы напряжения и характеристик обмотки, возникающее между витками напряжение может варьироваться.

Среднее напряжение на клеммах двигателя регулируется шириной импульсов и временем между ними. Пики напряжения тем выше, чем меньше время между импульсами. Это условие наиболее вероятно при высоких пиках или высоких выходных напряжениях, а также во время переходных процессов, таких как ускорение или замедление.

Если промежуток времени между импульсами менее чем в три раза резонансного временного периода кабеля (обычно от 0,2 до 2 мкс для промышленных кабелей), то наблюдается дополнительное перерегулирование.

Когда время между последовательными импульсами меньше 6 мкс, в частности, когда первый и последний витки одной катушки любой обмотки находятся рядом, можно предположить, что значение напряжение между соседними проводниками равно «от пика до пика» между импульсами. Это является результатом скорости распространения импульса в катушке, так как напряжение на первом витке становится «от пика до пика», а напряжение на последнем витке является очень низким, вероятно равным нулю.

Нижеприведенный пример, иллюстрирует минимальное время между соседними импульсами ниже 6 мкс и при этом наблюдались сбои в работе электродвигателя из-за короткого замыкания между витками.



6.5.4 Частота коммутации (f_s)

Кроме эффектов, вызванных временем нарастания и минимальным временем между соседними импульсами, следует рассмотреть также частоту, с которой они генерируются. В отличие от возможно проявляемых импульсов, речь идет о последовательности импульсов поддерживаемых на определенной частоте.

В связи с быстрым развитием силовой электроники, в настоящее время эта частота легко достигает значений 20кГц. Чем выше частота коммутации, тем быстрее происходит разрушение изоляции двигателя.

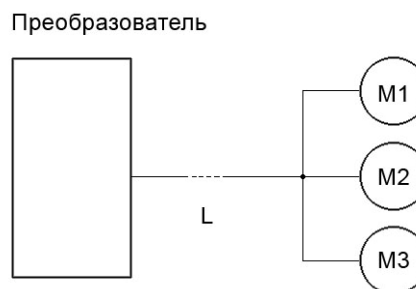
Исследования подтверждают, что нет простых взаимосвязей между сроком жизни изоляции и частотой коммутации. Несмотря на это, опыт показывает интересные данные:

- Если $f_s \leq 5$ кГц вероятность возникновения повреждения изоляции прямо пропорциональна частоте коммутации
- Если $f_s > 5$ кГц вероятность возникновения повреждения изоляции пропорциональна квадрату частоты коммутации.

Высокая частота переключения может вызвать повреждения подшипников. С другой стороны, результатом увеличения несущей частоты является улучшение формы напряжения двигателя (Быстрое преобразование Фурье) и также улучшение тепловых характеристик мотора помимо снижения шума.

6.5.5 Управление несколькими моторами

Если преобразователь управляет более чем одним двигателем, то могут наблюдаться дополнительные пики напряжения вследствие накладывания отражений от каждого мотора. Ситуация усугубляется, если моторы установлены далеко от преобразователя. Эта длина проводников действует как отделитель двигателя от преобразователя. В результате отражения, которые, как правило, поглощаются низким сопротивлением преобразователя, могут «перетекать» в другой двигатель и добавляться к пикам на клеммах.



При подключении нескольких моторов к одному преобразователю длина кабеля L должна быть как можно меньше.

6.6 Критерии к системе изоляции моторов WEG при работе от преобразователя частоты

При использовании низковольтных асинхронных электродвигателей с преобразователями частоты должны быть учтены следующие критерии для защиты системы изоляции мотора. Если любое из нижеперечисленных условий не соблюдается, то должны быть использованы фильтры.

Примечание: Применения с моторами, предназначенными для работы в опасных средах должны оцениваться особенно тщательно. В таких случаях, пожалуйста, контактируйте с WEG.

Номинальное напряжение	Пики напряж. на клеммах мотора	dV/dt на клеммах ПЧ	Время нараст. на клеммах ПЧ	Мин. время между соседними имп.
$V_{nom} \leq 460V$	$\leq 1600V$	$\leq 5200V/мкс$	$\geq 0,1мкс$	$\geq 6мкс$
$460V < V_{nom} \leq 575V$	$\leq 1800V$	$\leq 6500V/мкс$		
$575V < V_{nom} \leq 690V$	$\leq 2200V$	$\leq 7800V/мкс$		

Максимальная рекомендуемая частота коммутации 5кГц.

Влага вредна для изоляционных материалов, и поэтому следует избегать влажности в течение наиболее длительного срока для увеличения срока службы двигателя. Для того чтобы сохранить обмотки двигателя сухими, рекомендуется использовать нагревательные элементы.

Система изоляции, которая будет использоваться в каждом конкретном случае, зависит от номинального напряжения и от габарита мотора.

6.7 Нормативные соглашения о системе изоляции моторов, управляемых от преобразователя частоты

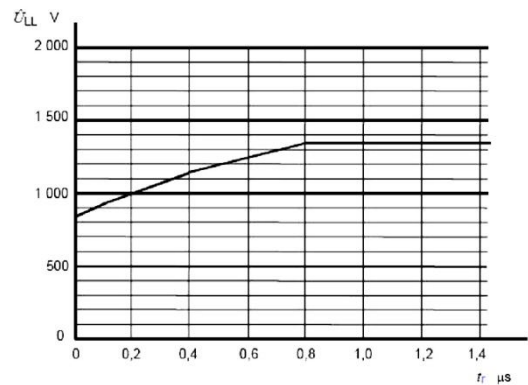
- **NEMA MG1** - если напряжение на входе преобразователя не превышает номинальное напряжение электродвигателя и, если напряжение на клеммах электродвигателя не превышает пределов, указанных ниже, то можно предположить, что срок службы системы изоляции не будет значительно уменьшен.

NEMA MG1 – Часть 30 Общепромышленные электродвигатели	NEMA MG1 – Часть 31 Электродвигатели для работы с ПЧ
$V_{ном} \leq 600V$ Упик $\leq 1кВ$ Время нарастания $\geq 2мкс$	$V_{ном} > 600V$ Упик $\leq 3,1V_{ном}$ Время нарастания $\geq 0,1мкс$
$V_{ном} \leq 600V$ Упик $\leq 2,04V_{ном}$ Время нарастания $\geq 1мкс$	$V_{ном} \leq 600V$ Упик $\leq 2,04V_{ном}$ Время нарастания $\geq 1мкс$

- **IEC 60034** - для двигателей до 500В изоляция должна выдерживать уровни пиков напряжения, как показано ниже. Для двигателей напряжением свыше 500В, должна быть применена усиленная система изоляции или на выходе преобразователя должны быть установлены фильтры с целью увеличения времени нарастания и ограничения пиков напряжения.

IEC60034-17

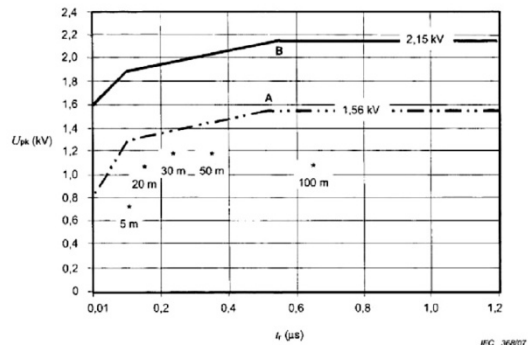
Общепромышленные электродвигатели



Действительно для стандартных электродвигателей

IEC60034-25

Специальные электродвигатели



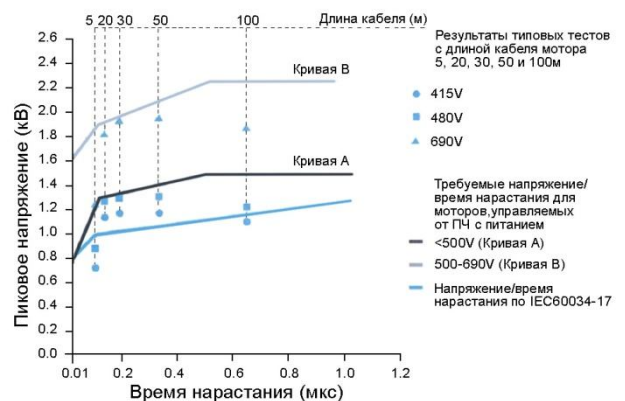
А: Для моторов до 500В (без фильтров)

В: Для моторов до 690В (без фильтров)

С: Измерения при питании 415В и различных длинах кабеля

- **GAMBICA/REMA** – Европейская ассоциация производителей электродвигателей (REMA) и преобразователей частоты (GAMBICA), устанавливают указанные далее критерии, полагаясь на опыте членов ассоциации.

Устойчивость электродвигателей к импульсам
Пиковое напряжение / Время нарастания



Следует отметить сходства между критериями IEC и GAMBICA, а также их несоответствие по отношению к NEMA критериям. Это происходит из-за разного определения времени нарастания и dV/dt . Можно заметить, что критерии изоляции IEC и GAMBICA учитывают длину кабеля, информацию о которой WEG также принимает во внимание.

6.8 Рекомендации для кабелей, соединяющих моторы WEG и преобразователи

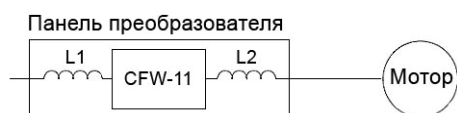
Как уже упоминалось, максимальное пиковое напряжение на клеммах электродвигателя, управляемого преобразователем частоты, зависит от многих факторов, и в основном от длины кабеля.

При использовании электродвигателей WEG с преобразователями частоты, предлагаются следующие практические правила для оценки необходимости использования фильтров между двигателем и преобразователем.

Длина кабеля	Выходной фильтр
$L \leq 100\text{м}$	Не требуется
$100\text{м} < L \leq 300\text{м}$	Выходной реактор требуется (падение напряжения 2%)
$L > 300\text{м}$	Требуется специальный фильтр (Контактируйте с WEG)

Выходной реактор необходим для ограничения вихревых токов, которые протекают от преобразователя на землю. Входной (линейный) реактор предотвращает преобразователь от помех по питанию.

Проектная мощность реактора должна учитывать дополнительные потери, возникающие из-за пульсаций тока и тока утечки на землю, что повышается по мере увеличения длины кабеля. Для длинных кабелей и реакторов, предназначенные для малых токов будет значительным влияние токов утечки на реакторе (и нагрев). Система охлаждения панели преобразователя (монтажного шкафа) должна учитывать дополнительные потери на реакторе для расчета безопасной рабочей температуры. Выходной реактор должен быть установлен рядом с преобразователем, как показано ниже.



L1 – Входной реактор – критерии выбора согласно п.5.2

L2 – Выходной реактор – должен быть установлен после преобразователя

6.8.1 Типы кабелей и рекомендации по установке

Характеристики кабельного соединения мотора и преобразователя частоты, так же как и их подключение и физическое расположение, крайне важны для предотвращения электромагнитной интерференции в других устройствах.

6.8.1.1 Неэкранированные кабели

Когда нет необходимости выполнения требований Европейской Директивы EMC (89/336/ЕЕС), может использоваться трехжильный неэкранированный кабель двигателя.

В конечной установке должны быть соблюдены некоторые минимальные расстояния между кабелями двигателя и кабелями других электрических цепей. Эти расстояния определены в таблице ниже.

Помехи от кабелей могут быть уменьшены, если они установлены вместе в металлический кабельный канал, который связан с системой заземления по крайней мере, на обоих концах кабеля. Магнитные поля от этих кабелей могут индуцировать токи в ближайших металлоконструкциях, что ведет к увеличению нагрева и потерям.

6.8.1.2 Экранированные кабели

Они помогают уменьшить излучение от кабеля двигателя в радиочастотном диапазоне.

Они необходимы, если установка должна соответствовать по электромагнитной совместимости 89/336/ЕЕС в соответствии с EN 61800-3.

Они также необходимы при использовании фильтров радиочастотных помех (будь то встроенный или внешний) на входе преобразователя.

Минимальные расстояния между кабелем двигателя и кабелями других электрических цепей (например, сигнальные кабели, кабели датчиков и т.д.) должны быть соблюдены в окончательной установке, как в таблице ниже.

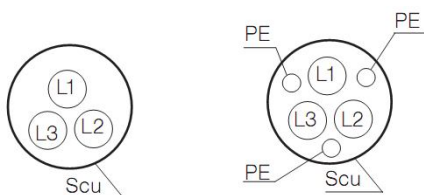
Рекомендации по расстояниям между кабелем мотора и другими кабелями	
Длина кабеля	Минимальное расстояние
$\leq 30\text{м}$	$\geq 10\text{см}$
$> 30\text{м}$	$\geq 25\text{см}$

6.8.1.3 Рекомендации по установке

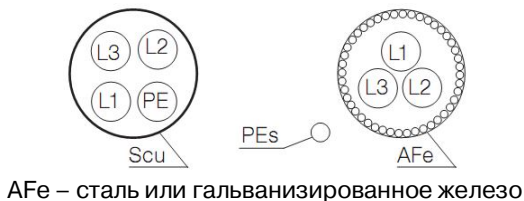
Стандарт IEC 60034-25 описывает типы кабелей и детали конструкций.

Система заземления должна быть способна обеспечить хорошее соединение между оборудованием, например, между двигателем и корпусом преобразователя. Разница напряжения или сопротивления между точками заземления может привести к появлению токов утечки и электромагнитным помехам.

Пример экранированных кабелей, рекомендованных стандартом IEC 60034-25



Альтернативные кабели мотора сечением до 10мм²



AFe – сталь или гальванизированное железо

Симметричный экранированный кабель: трехжильный кабель (с или без проводников защитного заземления) симметричный + концентрические медный или алюминиевый защитный экран / бронь.

PE = защитный провод

SCU = концентрический медный (или алюминиевый) экран

Экран кабеля должен быть заземлен на обоих концах, как на двигателе, так и на преобразователе. Эффективные методы EMC, такие как 360° склеивание экранов рекомендуются для того, чтобы обеспечить низкое сопротивление на высоких частотах.

Экран действует также в качестве защитного проводника, он должен иметь, по крайней мере, 50% от проводимости фазных проводов. Если экран не имеет достаточного сечения для этого, то необходимо отдельный заземляющий проводник для обеспечения и экранирования EMC и физической защиты. Высокочастотная проводимость экрана должна быть не менее 10% от фазовых проводов.

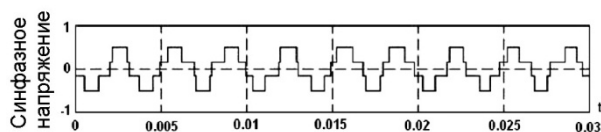
6.9 Влияние преобразователя на напряжение вала электродвигателя и подшипниковые токи

Применение преобразователей частоты усугубляется явлением наведенного напряжения/тока вала, из-за несбалансированной формы напряжения и высокочастотных компонентов напряжения, подаваемого на двигатель.

Наводимое, благодаря питанию ШИМ, напряжение на вал электродвигателя добавляется к существующему внутреннему напряжению, вызванному например, электромагнитным дисбалансом, которое также вызывает ток циркуляции через подшипники. Основной причиной подшипниковых токов протекающих в электромоторах, питаемых от преобразователей частоты, является так называемое синфазное напряжение. Емкостное сопротивление двигателя становится низким, благодаря высокочастотным составляющим напряжения на выходе преобразователя, что приводит к циркуляции тока через путь, образованный ротором, валом и подшипниками на землю.

6.9.1 Синфазное напряжение

Трехфазное напряжение на выходе преобразователя частоты, в отличие от чисто синусоидального напряжения не сбалансировано. Из-за топологии преобразователя, сумма векторов мгновенных напряжений трех фаз на выходе преобразователя не равна нулю, и образует высокочастотный электрический потенциал относительно нуля (обычно относительно земли или отрицательного звена шины постоянного тока), отсюда и наименование "синфазное напряжение".



Сумма мгновенных значений напряжения по трем фазам на выходе преобразователя не равна нулю.

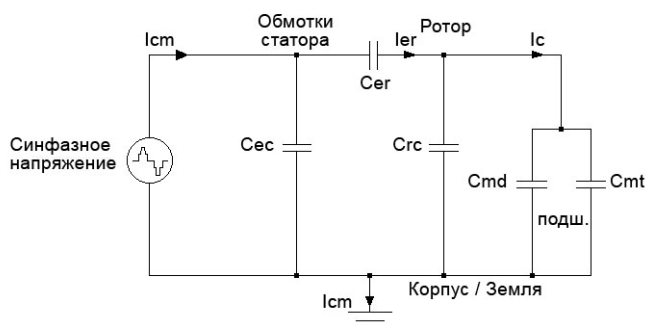
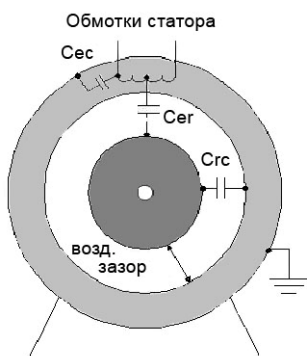
Такое высокочастотное синфазное напряжение может привести к нежелательным синфазным токам. Существующие паразитные емкости между двигателем и землей, могут проводить ток на землю, образуя контур, проходящий через ротор, вал и подшипники и завершающийся экраном (заземленным).

Практический опыт показывает, что более высокая частота коммутации приводит к увеличению синфазных напряжений и токов.

6.9.2 Эквивалентная схема замещения электродвигателя для высокочастотных емкостных токов

Высокочастотная модель схемы замещения электродвигателя, в которой подшипники представлены емкостями, показывает пути протекания токов утечки.

Ротор опирается на подшипники через слой непроводящей смазки. При высокой скорости вращения нет контакта между ротором и (заземленной) наружной дорожкой качения подшипника, благодаря равномерному распределению смазки. Электрический потенциал ротора может увеличиваться по отношению к земле пока не будет преодолена диэлектрическая прочность смазки, при этом происходит искрение напряжения и протекание разрядного тока через подшипники. Этот ток, протекающий в моменты пробоя смазки, часто упоминается как емкостная составляющая разрядного тока. Существует еще одна составляющая тока, который индуцируется потоком в магнитопроводе статора и постоянно циркулирует через характерный токопроводящий контур, состоящий из вала, подшипниковых щитов и корпуса. Ее часто называют резистивной составляющей.



- Cer: Емкость, образованная обмоткой статора и ламинацией ротора (Диэлектрик = воздушный зазор + изоляция ламината + изоляция провода)
- Crc: Емкость, образованная ротором и сердечником статора (Диэлектрик = воздушный зазор)
- Ces: Емкость, образованная обмотками статора и корпусом (Диэлектрик = изоляция ламината + изоляция провода)

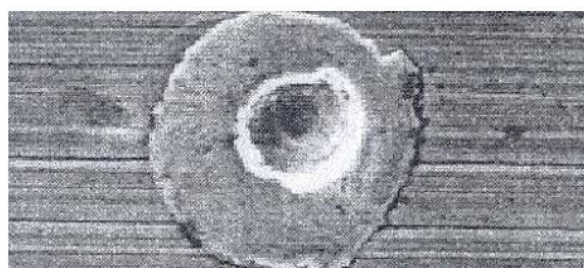
Cmd и Cmt: Емкости приводного и неприводного подшипников, образованные внутренней и внешней дорожками качения подшипников, с металлическими элементами качения во внутренней части. (Диэлектрик = зазоры между дорожками качения и телами качения + смазка для подшипников)

Icm: Полный синфазный ток

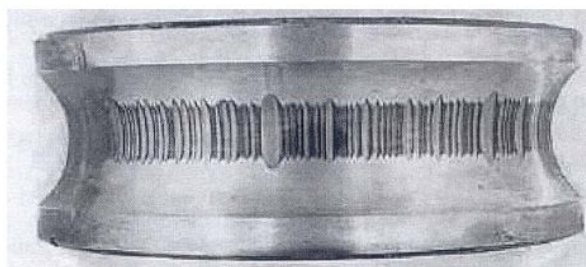
Ier: Емкостной ток утечки, протекающий от статора к ротору

Ic: Емкостной ток утечки, протекающий через подшипники

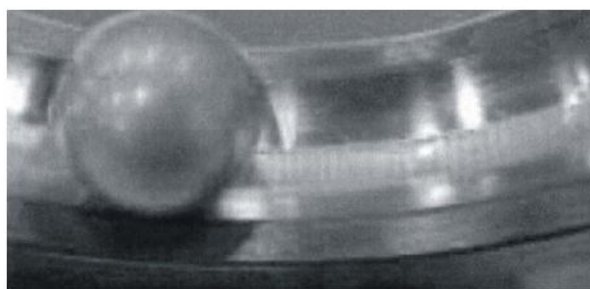
Эти непостоянные электрические разряды изнашивают дорожки качения и ослабляют вращающиеся элементы подшипников качения, образуя микроскопические раковины. Длительное протекание разрядного тока приводит к образованию борозд, которые уменьшают срок службы подшипников и могут привести к преждевременному выходу из строя электродвигателя.



Кратеры, образованные электроэрозией на внутренней дорожке подшипника



Износ дорожки подшипника током утечки



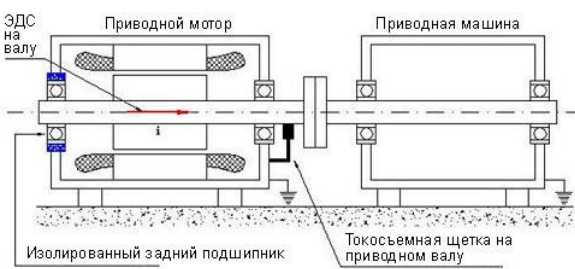
Гофрирования, вызванные электрическими разрядами в подшипнике

6.9.3 Методы уменьшения подшипниковых токов в электродвигателях при работе от ПЧ

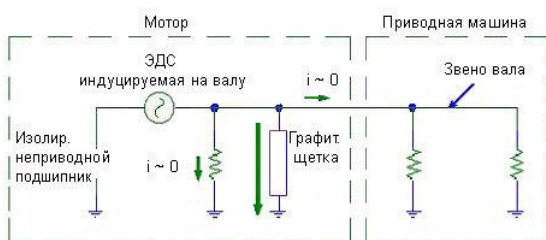
Для препятствия прохождению подшипниковых токов двигателя, должны быть учтены как резистивная составляющая (индуцированная на валу) так и емкостная (результат синфазного напряжения). Для того чтобы исключить ток протекающий через контур с подшипниками, достаточно изолировать хотя бы один из подшипников двигателя, если приводной вал один, или оба в случае двух приводных валов.

Однако для исключения емкостной компоненты необходимо изолировать подшипники рабочей машины для того чтобы избежать миграции электрических зарядов от двигателя к ротору рабочей машины через валы, которые электрически связаны в случае прямого соединения. Другой способ подавления емкостной компоненты тока заключается в коротком замыкании ротора и корпуса двигателя посредством скользящего контакта графитовой щетки. Таким образом, индуктивная составляющая тока может быть устранена путем изолирования только одного подшипника мотора, в то время как емкостная составляющая тока, а также прохождение емкостных разрядов на рабочий механизм можно устранить путем использования токосъемной щетки.

Мотор с одним приводным валом

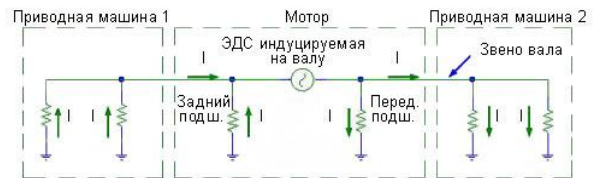
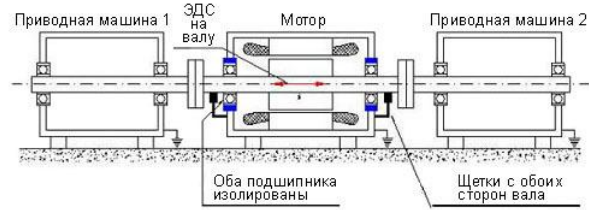


Без защиты подшипника

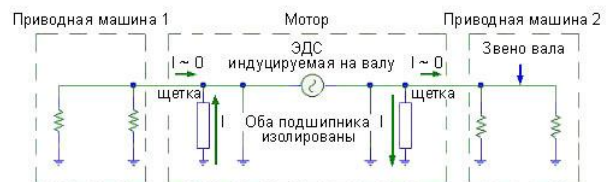


С защитой подшипника

Мотор с двумя приводными валами



Без защиты подшипника



С защитой подшипника

6.10 Критерии защиты от подшипниковых токов электродвигателей WEG управляемых от преобразователей частоты

Серия	Габарит	Стандарт	Опционально
W21 W22	< 315 IEC < 504 NEMA	Нет защиты	Свяжитесь с WEG
W21 W22	IEC 315 и 355 NEMA 504/5 и 586/7	Нет защиты*	Изолированный подшипник на любом или на обоих концах вала Система заземления корпуса и вала
HGF	IEC 315 ... 630 NEMA 500 ... 1040	Изолированный NDE подшипник Система заземления корпуса и вала	Изолированный DE подшипник
M	IEC 280 ... 1800 NEMA 440 ... 2800	Изолированный NDE подшипник Система заземления корпуса и вала	Изолированный DE подшипник

* Для двигателей, управляемых от преобразователей частоты, система заземления вала является стандартной
Система заземления корпуса и вала = Система заземления с контактными кольцами и графитовыми щетками между корпусом и валом
DE подшипник – подшипник с приводной стороны вала
NDE подшипник – подшипник с не приводной стороны вала

ВНИМАНИЕ: Применения двигателей для использования во взрывоопасных зонах должны оцениваться особенно тщательно - в этом случае, пожалуйста, свяжитесь с WEG.

6.11 Нормативные соглашения о токах, протекающих через подшипники в электродвигателях, управляемых от преобразователей частоты

NEMA MG1 Часть 31 - с синусоидальным напряжением питания на валу может присутствовать напряжение, как правило, для габаритов двигателей 500 и больше. (...) В последнее время для некоторых преобразователей и методов управления, потенциально разрушительные токи подшипника время от времени наблюдаются в значительно меньших двигателях. (...) Ток может протекать через один или оба подшипника на землю. Прерывание этого тока требует изолирования обоих подшипников. С другой стороны, могут быть использованы токосъемные щетки для прохождения тока мимо подшипника. Следует отметить, что изоляция подшипников электродвигателя не предотвращает повреждение вала соединенного оборудования.

В соответствии с руководством по применению NEMA для приводов переменного тока, блуждающие токи, вызванные синфазным напряжением, могут вызвать проблемы подшипниках электродвигателей габаритов меньше, чем 500 (наиболее часто 400 и выше).

IEC 60034-17 - для машин с габаритами выше 315 рекомендуется использовать преобразователь с фильтром, предназначенным для снижения фазных напряжений нулевой последовательности (так называемые синфазные напряжения) или уменьшить dV / dt напряжения или изолировать подшипник(и) двигателя. Изолировать оба подшипника в двигателе требуется крайне редко. В таком случае рекомендуется провести экспертизу всей системы привода, включая рабочую машину (изоляция соединительной муфты) и систему заземления (возможное использование токосъемной заземляющей щетки).

IEC 60034-25 - не определяет минимальный габарит мотора, на который должна быть установлена защита подшипников. Рассматриваются эффекты магнитной асимметрии как результат напряжения вала / подшипниковых токов, отмечено, что подшипниковые токи обычно наблюдаются в электродвигателях мощностью свыше 440 кВт. Для других случаев нет упоминаний относительно типоразмеров. Согласно документу, принимаемое решение относительно прекращения протекания токов в подшипниках зависит от того, какой токовый компонент следует исключить. Это может быть сделано либо с помощью изолированных подшипников или с помощью системы заземления вала.

CSA 22.2 N°100 Пункт 12 – Щетки заземления вала должны использоваться в электродвигателях типоразмеров выше IEC 280 (NEMA 440).

Gambica / REMA Техническое руководство – для электродвигателей габаритов ниже IEC 280 эффект протекания подшипниковых токов редко заметен и поэтому не требуется никакой дополнительной защиты. В таких случаях достаточно придерживаться рекомендаций производителей электродвигателя и преобразователя по установке, прокладке кабелей и заземлению. Для габаритов выше IEC 280, нежелательные эффекты от протекания токов в подшипниках могут быть значительными и для безопасности целесообразно обеспечить специальную защиту. Это может быть изолированный подшипник с неприводной стороны вала и использование системы заземления вала на корпус. В таком случае необходимо соблюдать осторожность, чтобы не закоротить изоляцию подшипника.

6.12 Влияние преобразователя на акустический шум двигателя

Вращающиеся электрические машины имеют три основных источника шума:

- Система вентиляции
- Подшипники качения
- Электромагнитное возбуждение

Исправные подшипники в отличном состоянии практически не являются источниками шума, по сравнению с другими источниками шума, производимого электродвигателем.

В двигателях, которые питаются синусоидальным питанием, особенно в 2-х полюсных (высокая скорость), основным источником шума является система вентиляции. С другой стороны, в двигателях с большим количеством полюсов и меньшими скоростями вращения часто выделяется электромагнитный шум.

Однако в приводах переменной частоты, особенно на низких рабочих скоростях, когда уменьшается шум от вентиляции, основным источником шума может быть электромагнитное возбуждение, независимо от полярности, вследствие гармонической составляющей напряжения.

Увеличение частоты коммутации приводит к снижению шума магнитного возбуждения двигателя.

6.13 Критерии касательно шума, излучаемого электродвигателями при работе с ПЧ

Результаты лабораторных тестов (4 точки измерения в полубезэховой акустической камере с инвертором вне комнаты) полученных с несколькими электродвигателями и преобразователями, работающими на различных частотах коммутации показали, что трехфазные асинхронные электродвигатели WEG, при питании от преобразователей частоты и работе на базовой скорости (обычно 50 или 60 Гц), увеличивают уровень звукового давления не более чем на 11 дБ (А).

6.14 Нормативные соглашения о шуме электродвигателей управляемых от преобразователей частоты

NEMA MG1 Часть 30 – уровень звука зависит от конструкции двигателя, числа пар полюсов, формы импульса, частоты коммутации, основной частоты и как результат скорости двигателя. Также должна быть рассмотрена ответная частота приводного оборудования. Уровень звука, производимого таким образом, будет выше, чем опубликованные значения при работе на скорости выше номинальной. На определенных частотах механический резонанс или магнитный шум может привести к значительному увеличению уровня шума, в то время как изменение частоты и / или напряжения может уменьшить уровень шума. Опыт показывает, что (...) увеличение от 5 до 15 дБ (А) может происходить при номинальной частоте в случае, когда двигатели используются с элементами управления ШИМ. Для других частот уровень шума может быть выше.

IEC 60034-17 - в связи с наличием гармоник, механизм генерирования магнитных шумов становится более сложным, чем для работы при синусоидальном питании. (...) В частности, может возникать резонанс на некоторых частотах в рабочем диапазоне скоростей. По опыту при постоянном потоке, уровень шума будет в диапазоне от 1 до 15 дБ(А).

IEC 60034-25 - преобразователь частоты и его принцип работы формируют три составляющие, которые непосредственно влияют на излучение шума, а именно: *изменение скорости вращения*, которая влияет на подшипники и смазки, вентиляцию и любые другие функции, которые зависят от изменения температуры; *частота напряжения питания* электродвигателя и содержание гармоник которые оказывают большое влияние на магнитный шум в сердечнике статора и менее значимое на шум в подшипниках; *круговые колебания* из-за взаимодействия волн магнитного поля различной частоты в воздушном зазоре электродвигателя. (...) Увеличение уровня шума в двигателе при питании от преобразователя частоты по сравнению с питанием от сети с синусоидальным напряжением является

относительно небольшим, если несущая частота преобразователя выше 3кГц. Для низких частот переключения, увеличение уровня шума может быть значительным - до 15 дБ (А). В некоторых случаях может возникнуть необходимость в создании "полосы пропускания частот" в диапазоне рабочих скоростей, для того, чтобы избежать специфических условий резонанса.

6.15 Влияние преобразователя на механическую вибрацию электродвигателя

Взаимодействия между гармониками тока и потока может привести к появлению паразитных сил, вызывающих механическую вибрацию и повышение общего уровня шума. Этот механизм приобретает большое значение, когда эти вибрации усиливаются механическим резонансом в двигателе или в рабочей машине.

Если любая из неосновных гармоник близка к собственной частоте вращения двигателя, то возникающие силы могут вызывать вибрацию.

Такие эффекты могут быть ослаблены тщательной разработкой штампов листов стали для статора и ротора двигателя, а также корпуса. Упрощение механической системы уменьшает возможность возникновения собственных частот, на которых появляются режимы вибрации в двигателе.

Современные преобразователи частоты имеют инструменты, позволяющие избегать таких проблем. Например, могут быть пропущены определенные частоты в пределах рабочего диапазона скоростей и легко скорректированы время разгона / торможения.

6.16 Критерии к уровням вибрации электродвигателей WEG при управлении от преобразователей частоты

Испытания, проведенные с несколькими двигателями и преобразователями после процедур, рекомендованными стандартом IEC60034-14 подтвердили, что уровень вибрации асинхронного двигателя увеличивается, когда он питается от преобразователя частоты.

Кроме того, наблюдаемые увеличения вибрации обычно были ниже на более высокой частоте коммутации. То есть увеличение несущей частоты ведет к уменьшению уровня вибрации электродвигателей при питании от преобразователей частоты.

В любом случае, даже при работе на скоростях выше номинальной, среднеквадратичные значения уровней вибрации двигателя WEG (мм / с) были ниже максимальных пределов, установленных в стандартах IEC 60034-14 и NEMA MG1 Часть 7. Таким образом, они соответствуют всем необходимым параметрам.

6.17 Нормативные соглашения о механической вибрации электродвигателей при питании от преобразователей частоты

NEMA MG1 Часть 30 - Когда асинхронный электродвигатель управляется преобразователем частоты, на различных частотах в диапазоне рабочих скоростей могут существовать пульсации момента. (...) Важно, чтобы оборудование не работало на скорости, где существует условие резонанса между механической и электрической системами (то есть, электрическим моментом). (...) Кроме того, существует вероятность того, что некоторые скорости в пределах рабочего диапазона могут соответствовать естественным механическим частотам нагрузки или опорной конструкции и эксплуатация на этих скоростях может быть разрушительной для нагрузки и/или двигателя. Поэтому работу на таких скоростях следует избегать.

NEMA MG1 Часть 31 - звук машины и вибрации зависит от следующих параметров: электромагнитной конструкции; типа преобразователя; резонанса конструкции рамы и корпуса; целостности, массы и конфигурации монтажной структуры основания; отражения звука и вибрации в месте соединения нагрузки и вала; парусность. Следует признать, что двигатели, применяемые в системах частотного регулирования, должны быть разработаны и оптимизированы для снижения шума и вибрации в соответствии с вышеописанными предписаниями. Однако, так как многие из этих влияющих факторов находятся за пределами самого двигателя, то не представляется возможным найти решение всех проблем шума и вибрации путем разработки двигателя в состоянии покоя.

IEC 60034-17 - асинхронные (постоянные по времени) крутящие моменты, генерируемые гармониками, имеют незначительное влияние на работу привода. Однако, это не относится к пульсациям моментов, которые производят вращающиеся колебания в механической системе. (...) В приводах с управлением от преобразователей частоты, частота пульсаций основного крутящего момента определяется частотой импульсов, а их амплитуда зависит от длительности импульса. (...) Однако они не оказывают вредного воздействия на приводную систему, так как их частота существенно выше критической механической частоты.

IEC 60034-25 - Если преобразователь имеет соответствующие выходные характеристики и если соблюдается надлежащая осторожность по отношению к механическим характеристикам и монтажу электродвигателя, то уровни вибрации будут аналогичными вибрации производимой при синусоидальном питании. Таким образом, нет никакой необходимости в определении критериев вибрации отличных от тех, которые уже существуют в IEC 60034-14 для синусоидального питания. Уровень вибрации, измеренный на отдельностоящем электродвигателе, свидетельствует только о качестве электродвигателя, но в измерениях, проводимых в действующем механизме (с установленным и двигателем и присоединенной нагрузкой), могут быть получены различные значения уровней вибрации.

7 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ И ПРИВОДНОЙ НАГРУЗКОЙ

7.1 Типы нагрузок

Правильный выбор системы привода с переменной скоростью зависит от знаний о поведении нагрузки, то есть, как нагрузка связана со скоростью и, следовательно, какой крутящий момент востребован на валу двигателя. В большинстве процессов нагрузка может быть описана одним из следующих условий: переменный крутящий момент постоянный крутящий момент и постоянная мощность.

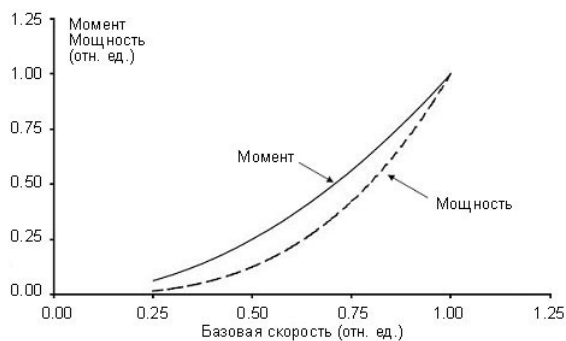
7.1.1 Нагрузки с переменным моментом

Типичные примеры:

- Центробежные насосы
- Центробежные вентиляторы
- Центробежные компрессоры

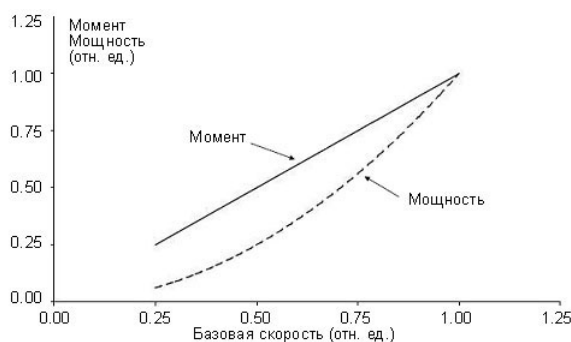
Нагрузки с переменным моментом являются хорошими кандидатами для применения регулируемого электропривода для экономии электроэнергии. Механическая мощность на валу электродвигателя не будет постоянной - она будет изменяться в зависимости от нагрузки, как было показано ранее в пункте 3 настоящего технического руководства.

Квадратичная зависимость момента



- Момент пропорционален квадрату скорости
- Мощность пропорциональна скорости в кубе
- 100% нагрузочного момента и мощности на номинальной скорости

Линейная зависимость момента



- Момент меняется линейно со скоростью
- Мощность пропорциональна квадрату скорости
- 100% нагрузочного момента и мощности на номинальной скорости

7.1.2 Нагрузки с постоянным моментом

Типичные примеры:

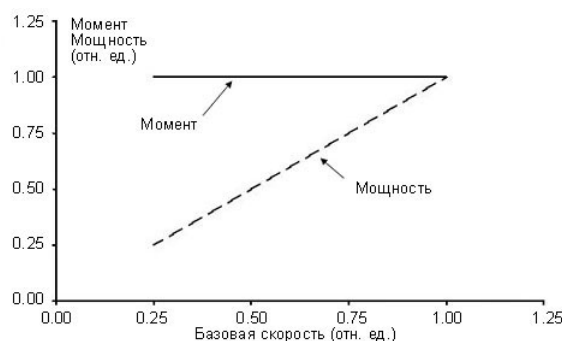
Винтовые компрессоры
 Поршневые компрессоры
 Объемные насосы
 Экструдеры
 Дробилки
 Шаровые мельницы
 Конвейеры
 Шнеки
 Технологические линии (полосы, лист)

Машины с высокими ударными нагрузками:

- прерывистый крутящий момент загрузки не в функции скорости, а требующий, чтобы управляемый электродвигатель производил достаточный динамический момент для возврата механизма с требуемой скоростью в начальное положение до начала следующего цикла работы;

или циклическими нагрузками:

- дискретная нагрузка - при изменяющейся или постоянной скорости периодически повторяемая в определенные периоды времени; обычно классифицируют механизмы с постоянным моментом.

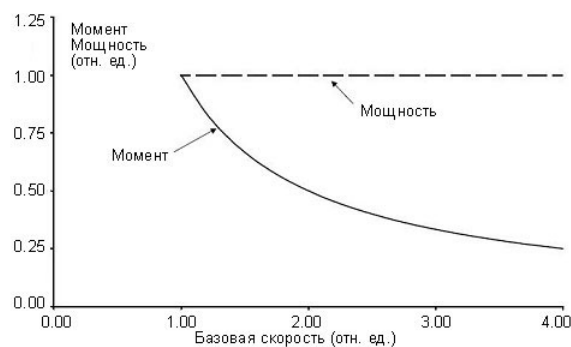


- Момент нагрузки остается постоянным в рабочем диапазоне скоростей
- Мощность изменяется линейно с изменением скорости
- Номинальный момент нагрузки и мощность на базовой скорости

7.1.3 Нагрузки с постоянной мощностью

Типичные примеры:

- Станки, в которых более тяжелые режимы реализуются на меньших скоростях и более легкие режимы реализуются на более высоких скоростях
- Намоточные центры



- Момент нагрузки уменьшается с увеличением скорости
- Мощность остается постоянной в рабочем диапазоне скоростей
- Номинальный момент нагрузки и мощность на базовой скорости

7.2 Скоростные режимы

7.2.1 Режим с переменной скоростью

Двигатели, разработанные для режима работы с переменной скоростью, подходят для разнообразных операций в определенном диапазоне скоростей, обозначенном на двигателе и не предназначены для непрерывной работы на одной фиксированной скорости. Конструкция двигателя имеет преимущество в том, что он будет работать с более низким подъемом температуры под нагрузкой.

7.2.2 Режим с постоянной скоростью

Двигатели, предназначенные для непрерывного скоростного режима, могут длительно эксплуатироваться на любой скорости в пределах определенного диапазона скоростей. Двигатель рассчитан по принципу, что он может работать при его уровне нагрузки на такой скорости, что будет самый высокий допустимый подъем температуры в течение неопределенного периода времени.

8 ПОДБОР И АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЙ АКТУАЛЬНОЙ ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ – ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ

8.1 Применения с постоянным моментом – компрессор

8.1.1 Пример

Рассчитайте стандартный асинхронный электродвигатель WEG с короткозамкнутым ротором для управления с любым преобразователем WEG в диапазоне скоростей от 180 до 1800 об/мин, приводя во вращение компрессор с моментом вращения 34 Нм. Требуемый температурный подъем класса В (80К). Общие данные:

- Питание: 3 фазы / 400В / 60Гц
- Окружающая среда: максимальная температура 40С; в.н.у.м. 1000м; нормальная атмосфера
- Преобразователь частоты CFW-09: $t_r = 0,1$ мкс; $f_{нес} = 5$ кГц

8.1.2 Решение

8.1.2.1 Подъем температуры обмоток (с уменьшением момента)

Компрессоры являются нагрузками, которые потребляют постоянный крутящий момент во всем диапазоне скоростей. Двигатель должен быть рассчитан, чтобы работать в наиболее критичных условиях работы, в этом примере это самая низкая скорость в пределах рабочего диапазона, в котором вентиляция уменьшается до минимума, а требуемый крутящий момент остается постоянным. Учитывая, что рабочая скорость может меняться от 180 до 1800 оборотов в минуту и, что базовая частота составляет 60 Гц, то должен быть выбран 4-полюсный электродвигатель. Пренебрегая скольжением, требуемая мощность в базовой точке составляет:

$$M_L (\text{кгс} \cdot \text{м}) = \frac{960P (\text{кВт})}{n (\text{об/мин})} \Rightarrow P = \left(\frac{34}{9.81} \right) \frac{1800}{960} = 6.5 \text{ кВт}$$

Тем не менее, с тепловой точки зрения худшей рабочей точкой для двигателя с самообдувом будет скорость 180 об/мин (6 Гц), что означает минимальную скорость и, следовательно, эффективность системы охлаждения двигателя в течение заданного диапазона скоростей будет также минимальной. По этой причине уменьшение крутящего момента должно быть рассчитано для этого режима.

В соответствии с WEG критериями снижения (раздел 6.4.1.2), при работе на 6 Гц уменьшения крутящего момента на 40% приводит к повышению температуры обмоток двигателя до 80°C. Кроме того, следует учитывать постоянство соотношения V/F, потому что указывается, что двигатель может работать с любым приводом WEG (для применимости решения оптимального потока, электродвигатели WEG с высоким КПД должны управляться преобразователем WEG серии CFW-09 версии 2.40 или выше).

$$f = 6 \text{ Гц} \Rightarrow \frac{f}{f_n} = \frac{6}{60} = 0.1$$
$$\frac{f}{f_n} = 0.1 \Rightarrow M_r = 0.6$$

То есть, при 180 оборотах в минуту двигатель будет в состоянии обеспечить только 60% от номинального крутящего момента. Если нагрузка требует постоянного крутящего момента (равного крутящему моменту на базовой скорости) во всем рабочем диапазоне, двигатель должен быть увеличен в габарите в соответствии рассчитанным уменьшением момента.

$$M = \frac{M_L}{M_r} = \frac{34}{0.6} = 56.7 \text{ Нм}$$

Так, номинальная мощность электродвигателя будет равна:

$$P = \left(\frac{56.7}{9.81} \right) \frac{1800}{960} = 10.83 \text{ кВт}$$

Из каталога электродвигателей WEG, идеальным электродвигателем для этого приложения является двигатель мощностью 11 кВт (15 л.с.) - 4-полюсный - 60 Гц - габарит IEC 132M (NEMA 215T).

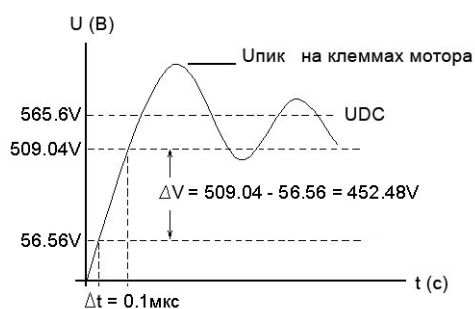
Использование системы принудительного охлаждения будет альтернативным вариантом. В этом случае увеличение габарита мотора не потребуется и двигатель мощностью 7,5 кВт (10 л.с.) - 4-х полюсный габарита IEC 132S (NEMA 213T) будет удовлетворять требованиям, необходимых приложению.

Таким образом, гарантируется, что повышение температуры двигателя будет равно или меньше, чем 80K в любом рабочем состоянии.

8.1.2.2 Система изоляции

В соответствии с NEMA критериями ситуация выглядит следующим образом:

Напряжение на клеммах электродвигателя:



В соответствии с критериями изоляции WEG (п. 6.6), электродвигатели WEG с напряжением питания 400В соответствуют следующим условиям:

- dV/dt значения до 5200 В/мкс на клеммах преобразователя, тем самым удовлетворяют условиям этого примера.

- $tr \geq 0,1$ мкс при клеммах преобразователя, таким образом, соответствуя применению в этом примере.

- $V_{\text{пик}} \leq 1430$ В на клеммах двигателя. Если это условие не удовлетворяется в конечной установке, то к выходу преобразователя необходимо подключить фильтр.

Частота коммутации для этого примера (5 кГц) также находится в соответствии с рекомендациями WEG. Таким образом, двигатель полностью соответствует требованиям данного приложения в отношении системы изоляции.

Тем не менее, не будет возможным оценить вопрос с точки зрения IEC, потому что он требует измерения напряжения на клеммах электродвигателя. Поскольку система преобразователь частоты – электродвигатель все еще находится на стадии расчета, и нет фактического электродвигателя для применения,

следует понимать, что невозможно провести измерения фактического пикового напряжения и времени нарастания напряжения на клеммах электродвигателя. Такие значения будут зависеть от типа и длины используемого кабеля конечным пользователем.

8.1.2.3 Защита подшипников

В соответствии с критериями WEG по защите от подшипниковых токов (пункт 6.9), стандартные электродвигатели WEG имеют опциональную защиту подшипников для габаритов с 315 IEC / 504 NEMA. Выбранный мотор имеет габарит 132M IEC / 215 T NEMA, следовательно, нет необходимости в системе заземления вала и в специальных изолированных подшипниках.

8.1.2.4 Шум

При управлении от преобразователя частоты акустический шум, производимый электродвигателем, может быть увеличен до 11дБ(А), учитывая работу в скалярном режиме.

8.2 Применение с квадратичным моментом – центробежный насос

8.2.1 Пример

Рассчитайте стандартный асинхронный электродвигатель WEG NEMA Premium класса КПД (TEFC) с короткозамкнутым ротором для работы с преобразователем CFW-09 в векторном режиме, приводя в движение центробежный насос мощностью 10HP (7.5кВт) при максимальной скорости 2700об/мин. Общие данные:

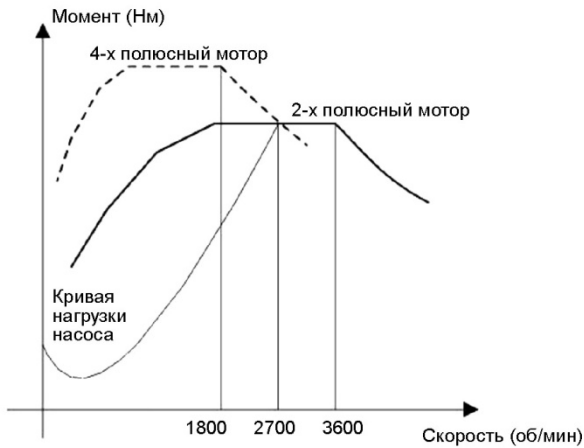
- Питание: 3 фазы / 460В / 60Гц
- Окружающая среда: максимальная температура 40С; в.н.у.м. 1000м; нормальная атмосфера
- Преобразователь частоты CFW-09: $tr = 0,1$ мкс; $f_{\text{нес}} = 2,5$ кГц

8.2.2 Решение

8.2.2.1 Подъем температуры обмоток (с уменьшением момента)

Центробежные насосы имеют квадратичную зависимость крутящего момента от скорости вращения, в то время как мощность изменяется пропорционально кубу скорости. В этом случае, двигатель должен быть рассчитан на максимальную скорость в пределах рабочего диапазона насоса, потому что именно на ней происходит максимальное потребление момента.

Рисунок показывает, что этот пример имеет два варианта выбора: 2-полюсный двигатель, либо 4-полюсный двигатель. 2-полюсный двигатель будет работать в диапазоне с постоянным моментом (на скорости ниже базовой), а 4-полюсный двигатель будет работать в диапазоне ослабления поля (на скорости выше базовой).



Момент, необходимый насосу на максимальной скорости:

$$M(\text{кгс} \cdot \text{м}) = \frac{716P(\text{л.с.})}{n(\text{об/мин})} \Rightarrow M_{\text{ном}} = \frac{716(10)}{2700} = 25,99\text{Нм}$$

2-х полюсный мотор

$$2700 \text{ об/мин} = 0,75 \text{ о.е.} \Rightarrow 45\text{Гц}$$

В соответствии с критериями снижения момента, электродвигатели WEG NEMA Premium класса КПД TEFC (пункт 6.4.1.1), способны работать в диапазоне 1000:1 с переменным моментом нагрузки, то есть, нет необходимости снижения момента во всем диапазоне скоростей. Тогда поправочный коэффициент будет равен 1.

$$M_{2p} = \left(\frac{M_{\text{ном}}}{df}\right) = \frac{25,99\text{Нм}}{1} = 25,99\text{Нм}$$

Из каталога электродвигателей WEG NEMA, наиболее подходящим трехфазным электродвигателем будет мотор Premium класса КПД 15л.с. (11кВт) - 2-х полюсный – 60Гц – габарита 254Т.

4-х полюсный мотор

$$2700 \text{ об/мин} = 1,5 \text{ о.е.} \Rightarrow 90\text{Гц}$$

В соответствии с критериями снижения момента, электродвигатели WEG NEMA Premium класса КПД TEFC (пункт 6.4.1.1), способны поддерживать постоянную мощность от 90 до 90Гц с нагрузкой с переменным моментом. Тогда на 90Гц поправочный коэффициент будет равен (1/1,5).

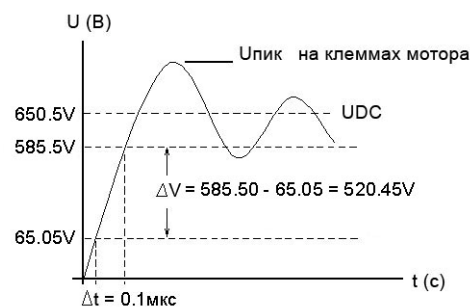
$$M_{4p} = \left(\frac{M_b}{df}\right) = \frac{25,99\text{Нм}}{1/1,5} = 38,99\text{Нм}$$

Вследствие работы в области ослабления магнитного поля, также должен быть проверен критический вращающий момент двигателя. В соответствии с критериями WEG по критическому вращающему моменту (подпункт 6.4.3), двигатель соответствует требованиям приложения. Наиболее подходящим трехфазным электродвигателем NEMA Premium класса КПД является двигатель 10 л.с. (7,5 кВт) - 4 полюса - 60 Гц - габарит 215Т.

Таким образом, после проведения технического и экономического анализа, наиболее подходящим двигателем для такого применения, является, 4-полюсный / 7,5 кВт (10 л.с.) / 60Гц / 460В / габарит 215Т NEMA Premium класса КПД.

8.2.2.2 Система изоляции

В соответствии с NEMA критериями ситуация выглядит следующим образом:



$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{520,45\text{В}}{0,1\text{мкс}} \cong 5200\text{В/мкс}$$

В соответствии с критериями изоляции (п. 6.6), электродвигатели WEG, напряжением 460В, соответствуют:

- значения dV/dt до 5200В/мкс на клеммах привода, тем самым удовлетворяя требованиям примера этого применения.
- $tr \geq 0,1\text{мкс}$ на клеммах преобразователя, тем самым удовлетворяя требованиям примера этого применения.
- $V_{\text{пик}} \leq 1430\text{В}$ на клеммах двигателя. Если это условие не выполняется в окончательной установке, необходима установка фильтров на выходе преобразователя.

WEG рекомендует использовать частоту коммутации до 5 кГц. Частота коммутации, определенная для этого примера (2,5 кГц) соответствует рекомендациям WEG. Таким образом, выбранный электродвигатель, полностью соответствует требованиям данного приложения в отношении системы изоляции.

Тем не менее, не будет возможным оценить данный вопрос с точки зрения IEC, потому что он требует измерения напряжения на клеммах. Так как приводная система все еще находится на стадии выбора, и нет фактического выбранного электродвигателя, то понятно, что провести конкретные измерения по-прежнему остается невозможным и неизвестны фактические пиковое напряжение и время нарастания напряжения на клеммах электродвигателя. Такие значения будут зависеть от типа и длины используемого кабеля после установки.

8.2.2.3 Защита подшипников

В соответствии с критериями WEG по защите от подшипниковых токов (пункт 6.9), стандартные электродвигатели WEG имеют опциональную защиту подшипников для габаритов с 504 NEMA. Выбранный мотор имеет габарит 215T NEMA, следовательно нет необходимости в системе заземления вала и в специальных изолированных подшипниках.

8.3 Специальное применение – длинный кабель

8.3.1 Пример

Необходимо оценить пики напряжения на клеммах специального двигателя WEG мощностью 9 кВт - 2115 об/мин - 500 В - 72 Гц. Электродвигатель должен быть подключен к преобразователю частоты кабелем длиной 100 метров.

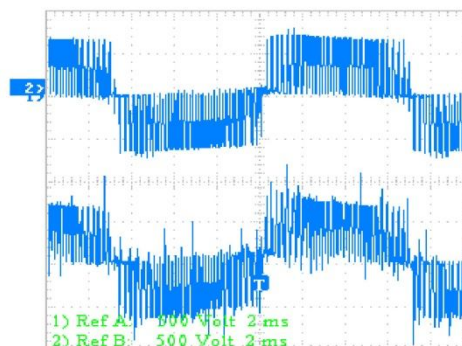
8.3.2 Решение

Если предположить, что уменьшение момента, защита подшипников и шумовые критерии были проверены и что двигатель полностью соответствует перечисленным критериям, все же необходимо проверить систему изоляции электродвигателя. Необходимо быть уверенным, что изоляция двигателя будет соответствовать условиям применения. Из-за большой длины кабеля есть вероятность появления скачков напряжения (выбросов) на клеммах электродвигателя и поэтому особое внимание должно быть уделено вопросу изоляции.

В этом случае для соответствующей оценки системы изоляции, должна быть рассмотрена самая высокая скорость в пределах рабочего диапазона, с тем, что на клеммах двигателя будет максимальный уровень напряжения, в результате чего пики напряжения будут максимально большими.

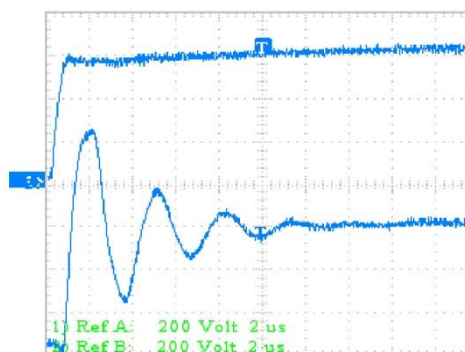
В соответствии с критериями изоляции двигателей WEG (п. 6.6), асинхронные машины напряжением 500В способны выдерживать скачки напряжения до 1780В и dV/dt до 6500В/мкс.

В этом случае будет возможность проанализировать пики напряжения на клеммах двигателя, как того требует IEC, после фактической установки становятся известными факторы, оказывающие влияние на возникновение и уровень помех. Следующие осциллограммы были получены путем проведения измерений на клеммах преобразователя (вверху) и на клеммах двигателя (снизу). Важно отметить, что профиль напряжения на входе двигателя изменится, если будет использован другой кабель. Используемый здесь кабель не экранированный и состоит из 4-х проводников (3 фазы + земля) распределенных асимметрично. Преобразователь был запитан синусоидальным напряжением 500В/50Гц и был использован режим скалярного управления с частотой коммутации 4кГц.



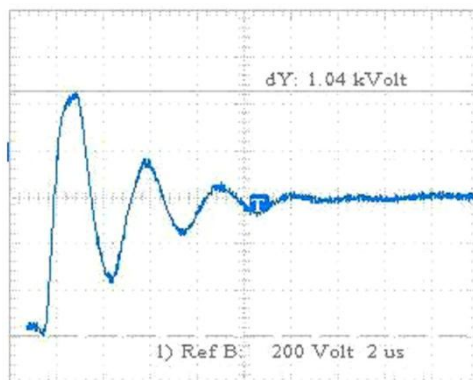
Верхняя кривая: ШИМ напряжение на клеммах преобразователя

Нижняя кривая: ШИМ напряжение на клеммах мотора



Увеличенная форма импульса напряжения для анализа tr и $V_{пик}$.

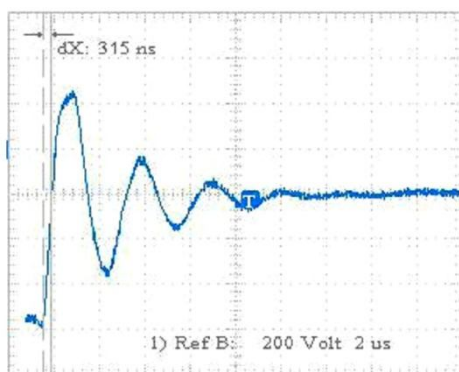
Величина импульса напряжения на клеммах двигателя



$V_{\text{пик}} \approx 1040\text{В}$

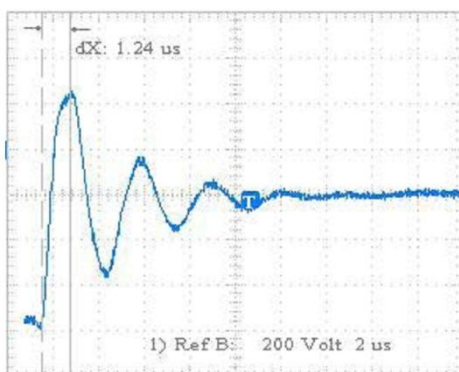
Критерий WEG – 1780В (>1040В) – Ок!
 Критерий NEMA – $3,1 \cdot 500 = 1550\text{В}$ (<1780В) – Ок!
 Критерий IEC – 1300В (<1780В) – Ок!

Время нарастания



$t_r \approx 0,8 \cdot 0,315 = 0,25\text{мкс} = \Delta t$

Критерий WEG – 0,1мкс (минимум) на клеммах преобразователя – Ок!
 Критерий NEMA – 0,1мкс (минимум) на клеммах преобразователя – Ок!



$t_r \approx 0,8 \cdot 1,24 = 0,99\text{мкс} = \Delta t$

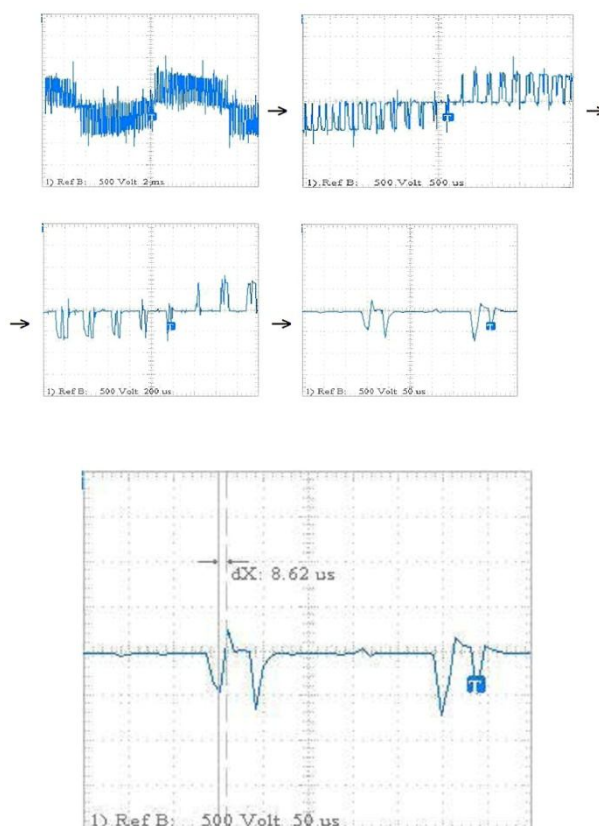
Критерий IEC – минимальное значение для t_r для клемм мотора не установлено

dV/dt

На клеммах преобразователя
 $\Delta V = 0,8 \cdot V_{\text{DC}} = 0,8 \cdot (500 \cdot 1,414) = 565,6\text{В}$
 $\Delta t = 0,25\text{мкс}$
 $dV/dt \approx \Delta V/\Delta t = 2262,7\text{В/мкс}$

На клеммах электродвигателя
 $\Delta V = 0,8 \cdot V_{\text{пик}} = 0,8 \cdot 1040 = 832\text{В}$
 $\Delta t = 0,99\text{мкс}$
 $dV/dt \approx \Delta V/\Delta t = 840,4\text{В/мкс}$
 Критерий WEG – 6500В/мкс (>2262,7В/мкс) – Ок!
 Критерий NEMA – 6500В/мкс – Ок!
 Критерий IEC – 840,4В/мкс (<6500В/мкс) – Ок!

Минимальное время между соседними импульсами



MTBP $\approx 8,6\text{мкс}$

(форма сигнала показанного на диаграмме является аналогом сигнала на других чертежах в данном примере, но для удобства увеличен масштаб для использования оценки минимального времени между последовательными импульсами).

Критерий WEG = 6мкс – Ок!

Таким образом, исследованы все критерии изоляции электродвигателей WEG и, следовательно, использование фильтров не требуется. Однако эти выводы справедливы только для рассматриваемого комплекта (преобразователь частоты - электродвигатель – кабель двигателя). Как упоминалось ранее, использование другого кабеля или преобразователя может привести к изменению пиков напряжения на зажимах электродвигателя.

8.4 Применение с переменной скоростью / переменным моментом

8.4.1 Пример

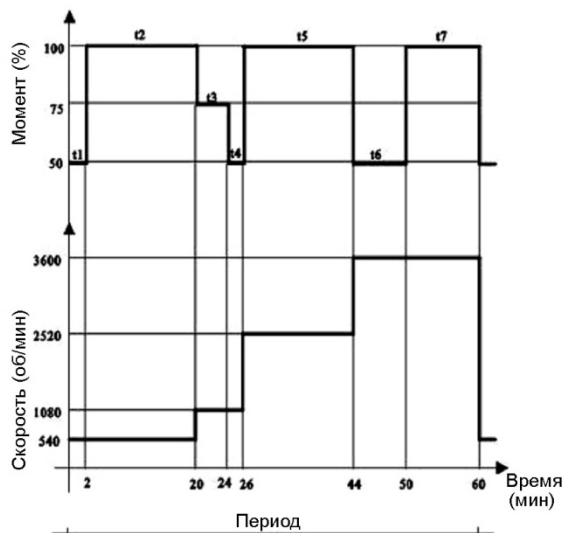
Необходимо подобрать стандартный электродвигатель WEG с короткозамкнутым ротором степени защиты IP55. Электродвигатель должен быть рассчитан на применение в текстильной промышленности и будет работать от преобразователя частоты неизвестного производителя.

Информация о применении:

- 50 Нм при полной нагрузке
- Диапазон скоростей от 540 до 3600 об/мин
- Желаемый класс повышения температуры обмоток В (80 К)
- Прямое соединение с нагрузкой
- Нагрузочный цикл показан на диаграмме ниже
- Нет необходимости принудительного обдува

Общие данные:

- Питание: 3 фазы / 380В / 60Гц
- Температура окр.ср. 40°C, в.н.у.м. 1000м



8.4.2 Решение

Учитывая рабочий диапазон (от 540 до 3600 об/мин) и базовую частоту (60Гц), необходимо выбрать 2-полюсный электродвигатель, потому что более высокое количество полюсов приведет к высокой рабочей частоте и значительному уменьшению крутящего момента на частоте выше 60 Гц. На базовой скорости, пренебрегая скольжением, нагрузка требует:

$$P_{(CV)}(\text{Вт}) = Mr(\text{Нм}) * \omega(\text{рад/с}) = (50) \frac{3600 * 2 * 3,14}{60} = 18,84 \text{ кВт}$$

В соответствии с критерием снижения крутящего момента стандартных электродвигателей WEG

действительного для условия постоянного потока ($V/f = \text{const}$) (пункт 6.4.1.2), для работы при 60 Гц крутящий момент должен быть уменьшен до 0,95 для того, чтобы повышение температуры машины соответствовало пределам температурного класса В. Однако, не возможно уменьшить на 5% нагрузку, так как она требует постоянного крутящего момента. Поскольку использование независимой вентиляции не предусмотрено, двигатель должен быть большего габарита. Таким образом, номинальная мощность на самом деле должна быть выше, чем первоначально рассчитанное значение:

$$P = \frac{18,84}{0,95} = 19,83 \text{ кВт}$$

Из каталога продукции WEG выбираем наиболее подходящий стандартный электродвигатель мощностью 22 кВт и 2 полюса. Если бы рабочий цикл был непрерывным, с полной нагрузкой полный рабочий день и без изменения скорости, то подбор двигателя был бы завершен. Тем не менее, фактически в рабочем цикле присутствуют изменения, как скорости, так и момента нагрузки. Таким образом, для правильного теплового подбора, необходимо проанализировать зависимость нагрузки на каждом сегменте рабочего цикла, так что эквивалентный крутящий момент двигателя может быть окончательно рассчитан с учетом всего рабочего цикла. После получения значения эквивалентного момента, надо быть уверенным, что выбранный электродвигатель будет в состоянии обеспечить максимальную мощность, потребляемую в течение всего рабочего цикла. Если предположить, что повышение температуры прямо пропорционально потерям и что тепловые потери являются преобладающим компонентом общих потерь электродвигателя, то потери изменяются пропорционально квадрату скорости и нижеприведенное уравнение является верным:

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 \left(\frac{M_i}{df_i}\right)^2 t_{if}}{\sum_{i=1}^7 t_i}}$$

где:

M_{eq} : эквивалентный момент двигателя

M_i : момент в зависимости от нагрузки для каждой рабочей скорости

df_i : поправочный коэффициент применяемый для каждой рабочей скорости, учитывающий повышение температуры из-за гармоник и уменьшения вентиляции

t_i : период каждого сегмента цикла, рассчитываемый как указано ниже:

$t_i = t_{if} + t_{ip}/k_v$

t_{if} : временной интервал вращения двигателя (с нагрузкой или без)

t_{ip} : сумма временных интервалов когда двигатель не вращается

k_v : константа, зависящая от охлаждения двигателя

Если обдув электродвигателя не зависит от его вращения (например, TENV моторы), тогда $k_v = 1$
 Если обдув электродвигателя зависит от его вращения (например, TEFC моторы), тогда $k_v = 3$

Таким образом, необходимо рассчитать поправочный коэффициент (df) для каждого участка рабочего цикла.

Период (мин)	2	18	4	2	18	6	10
Момент (о.е.)	0,50	1,00	0,75	0,50	1,00	0,50	1,00
Момент (Нм)	25,0	50,0	37,5	25,0	50,0	25,0	50,0
Скорость (об/мин)	540	540	1080	1080	2520	3600	3600
Частота (Гц)	9	9	18	18	42	60	60
Частота (о.е.)	0,15	0,15	0,30	0,30	0,70	1,00	1,00
Поправочный коэффициент* (df)	0,65	0,65	0,77	0,77	0,91	0,95	0,95

* В соответствии с критерием для стандартных моторов при работе от ПЧ с постоянным потоком ($V/f = \text{const}$) (6.4.1.2)

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{\left(\frac{M_{50\%}}{0,65}\right)^2 * 2 + \left(\frac{M_{100\%}}{0,65}\right)^2 * 18 + \left(\frac{M_{75\%}}{0,77}\right)^2 * 4 + \left(\frac{M_{50\%}}{0,77}\right)^2 * 2 + \left(\frac{M_{100\%}}{0,91}\right)^2 * 18 + \left(\frac{M_{50\%}}{0,95}\right)^2 * 6 + \left(\frac{M_{100\%}}{0,95}\right)^2 * 10}{(2 + 18 + 4 + 2 + 18 + 6 + 10)}}$$

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{\left(\frac{25,0}{0,65}\right)^2 * 2 + \left(\frac{50,0}{0,65}\right)^2 * 18 + \left(\frac{37,5}{0,77}\right)^2 * 4 + \left(\frac{25,0}{0,77}\right)^2 * 2 + \left(\frac{50,0}{0,91}\right)^2 * 18 + \left(\frac{25,0}{0,95}\right)^2 * 6 + \left(\frac{50,0}{0,95}\right)^2 * 10}{(2 + 18 + 4 + 2 + 18 + 6 + 10)}}$$

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{(38,5)^2 * 2 + (76,9)^2 * 18 + (48,7)^2 * 4 + (32,5)^2 * 2 + (54,9)^2 * 18 + (26,3)^2 * 6 + (52,6)^2 * 10}{(2 + 18 + 4 + 2 + 18 + 6 + 10)}} = 58,8 \text{ Нм}$$

Нагрузка потребляет следующую мощность:

$$P(\text{Вт}) = Mr(\text{Нм}) * \omega \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right) = \\ = (58,8) \frac{3600 * 2 * 3,14}{60} = 22,15 \text{ кВт}$$

Из каталога продукции WEG для данного применения (3600об/мин и 60Гц), выбираем наиболее подходящий стандартный электродвигатель мощностью 30 кВт, 2 полюса, габарит 200M (NEMA 324T) TEFC.

8.5 Пример использования режима оптимального потока WEG

8.5.1 Пример

Учитывая предыдущее применение из последнего примера, подберите, пожалуйста, асинхронный электродвигатель WEG с короткозамкнутым ротором Премиум класса КПД с управлением от преобразователя частоты WEG модели CFW-09 (версия 2.40). Желательный подъем температуры класса F (105K).

8.5.2 Решение

Рассматривая комбинацию электродвигателя Премиум класса КПД и характеристики преобразователя (CFW09 версии 2.40 или выше), отметим, что в данном случае оптимальный поток может быть выгодно использован. Этот пример направлен на доказательство преимуществ, обеспечиваемых применением решения оптимального потока.

Необходимо пересчитать поправочный коэффициент (df), применимый для каждого участка рабочего цикла, но на этот раз в соответствии с критериями снижения крутящего момента действительных для двигателей Премиум класса КПД при оптимальном потоке (подпункт 6.4.1.2), с учетом подъема температуры класса "F".

Период (мин)	2	18	4	2	18	6	10
Момент (о.е.)	0,50	1,00	0,75	0,50	1,00	0,50	1,00
Момент (Нм)	25,0	50,0	37,5	25,0	50,0	25,0	50,0
Скорость (об/мин)	540	540	1080	1080	2520	3600	3600
Частота (Гц)	9	9	18	18	42	60	60
Частота (о.е.)	0,15	0,15	0,30	0,30	0,70	1,00	1,00
Поправочный коэффициент* (df)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

* В соответствии с критерием для моторов с высоким КПД при работе от ПЧ с оптимальным потоком ($V/f = \text{optimal}$) (6.4.1.2)

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{\left(\frac{M_{50\%}}{1,00}\right)^2 * 2 + \left(\frac{M_{100\%}}{1,00}\right)^2 * 18 + \left(\frac{M_{75\%}}{1,00}\right)^2 * 4 + \left(\frac{M_{50\%}}{1,00}\right)^2 * 2 + \left(\frac{M_{100\%}}{1,00}\right)^2 * 18 + \left(\frac{M_{50\%}}{1,00}\right)^2 * 6 + \left(\frac{M_{100\%}}{1,00}\right)^2 * 10}{(2 + 18 + 4 + 2 + 18 + 6 + 10)}}$$

$$M_{eq} = \sqrt{\frac{(25,0)^2 * 2 + (50,0)^2 * 18 + (37,5)^2 * 4 + (25,0)^2 * 2 + (50,0)^2 * 18 + (25,0)^2 * 6 + (50,0)^2 * 10}{(2 + 18 + 4 + 2 + 18 + 6 + 10)}} = 46,0\text{Нм}$$

Нагрузка потребляет следующую мощность:

$$P(\text{Вт}) = Mr(\text{Нм}) * \omega \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right) = \\ = (46,0) \frac{3600 * 2 * 3,14}{60} = 17,33\text{кВт}$$

Из каталога продукции WEG для данного применения (3600об/мин и 60Гц), выбираем наиболее подходящий электродвигатель Премиум класса КПД мощностью 18,5 кВт, 2 полюса, габарит 160М (NEMA 284Т) TEFC.

Этот пример показывает, что решение управления электродвигателем с оптимальным потоком обеспечивает более эффективное использование энергии. Это позволяет использовать мотор меньшего габарита и без принудительной вентиляции.

9 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ФОРМЫ ШИМ

9.1 Предупреждение

Измерений рассматриваемые в настоящем пункте включают потенциально смертельные уровни напряжения и тока. Только квалифицированные специалисты, знакомые с конструкцией и эксплуатацией оборудования и сопутствующими опасностями должны производить эти измерения.

измерять истинные среднеквадратичные значения. Некоторые из них не будут считывать основную составляющую ШИМ сигнала. Гармонические измерительные приборы с достаточно высокой скоростью выборки могут измерять как среднеквадратичные, так и основные значения напряжения, тока и мощности. В большинстве случаев подходит осциллограф с изолированными щупами и подходящей полосой пропускания.

9.2 Измерительные приборы

Преобразователи частоты питают электродвигатели ШИМ напряжением, которое не является синусоидальным. Для надежности измерения такого напряжения должны проводиться надлежащим оборудованием. Должны применяться современные цифровые измерительные приборы, которые способны

9.3 Измерение параметров

В соответствии с руководством по применению NEMA для приводов переменного тока, для измерения различных параметров рекомендуется использовать приборы, как описано в таблице ниже.

Параметр	Типичное измерение	Требуемый инструмент	Причина
Контроль входного напряжения	Основное	Аналоговый или цифровой мультиметр	Контроль входного напряжения
	Переходный процесс	Осциллограф (20МГц или выше)	Фиксация вариации входного напряжения
Контроль выходного напряжения ПЧ или входного напряжения мотора	Основное	Измеритель, способный измерять огибающую несинусоидальную форму волны	Контроль напряжения мотора
	Пики переходного процесса и dV/dt	Осциллограф с частотой дискретизации 1мкс	Сравнение пиков напряжения мотора и времени нарастания с допустимыми значениями
Контроль входного тока	Действующее значение	Измеритель действующего значения	Проверка габарита
Контроль выходного тока ПЧ или входного тока мотора	Действующее значение	Измеритель действующего значения	Оценка перегрева
	Основное	Измеритель способный измерить несинусоидальный сигнал	Оценка момента
Гармоники входного напряжения	Основное плюс гармоники	Анализатор спектра	Соответствие с IEEE-519
Гармоники входного тока	Основное плюс гармоники	Анализатор спектра	Соответствие с IEEE-519
КПД привода	Не доступно	Не доступно	Нет практики из-за сложности точного измерения величин электродвигателя

9.4 Согласование заземления

Безопасное, надежное и помехоустойчивое измерение зависит от хорошего заземления. При установке заземления необходимо следовать рекомендациям производителя, а также местным правилам заземления.

9.4.1 Заземление системы управления

Система управления должна быть надежно заземлена к главной системе заземления. Не допускается использовать общее заземление со сварочным электрооборудованием или электрооборудованием, потребляющим большой ток (как правило, в 5 раз больший, чем потребляемый управлением). Если существует любое из этих условий, то должен быть использован развязывающий трансформатор, рассчитанный на установленное управление, с вторичными обмотками, соединенными в звезду, с глухозаземленной нейтралью. Если используется более одной системы управления, каждая из них должна быть заземлена непосредственно в клемму системы заземления - они не должны быть заземлены последовательно.

9.4.2 Заземление электродвигателя

Выходной заземляющий провод может быть проложен в одном кабеле вместе с силовыми проводниками электродвигателя переменного тока. Металлическая оплетка силового кабеля может обеспечить EMC

экранирование, но она не может обеспечить надежного заземления электродвигателя, поэтому должен быть использован отдельный заземляющий провод. Заземляющий провод двигателя не должен быть подключен к металлическому экрану кабеля.

9.5 Процедуры измерения

Реальные условия работы (особенно в отношении скорости двигателя, типа управления и частоты коммутации) должны учитываться при проведении измерений. Стоит отметить, что более высокие скорости требуют более высоких уровней напряжения и, следовательно, работа на самой высокой скорости в диапазоне рабочих частот, приведет к максимально возможным пикам напряжения на клеммах двигателя.

9.5.1 Визуализация формы волны

Правильная оценка системы электропривода сильно зависит от надлежащего анализа измеренных сигналов. Отображение одного цикла (или отдельных частей цикла) колебательного сигнала ШИМ напряжения на клеммах двигателя дает представление о качестве импульсов на клеммах двигателя. Для лучшей проверки согласованности этих импульсов, рекомендуется визуализация двух-трех циклов, как только она свидетельствует о корректной повторяемости таких импульсов. Детальный анализ одного импульса в конечном итоге позволяет сделать выводы о времени нарастания и интенсивности пика напряжения.

9.5.2 Настройка шкалы осциллографа

Выбор шкалы и масштабирования зависит от величины измеряемых электрических величин. Тем не менее, диапазоны, показанные в приведенной ниже таблице, обычно подходят для измерений сигналов с частотой 50/60 Гц и могут быть использованы для первичной оценки.

Визуализация	Ось X	Ось Y
1 цикл	1 – 2 мс / дел	100 – 500 В / дел
3 цикла	5 – 10 мс / дел	100 – 500 В / дел
1 импульс	0,1 – 10 мкс/дел	100 – 500 В / дел

9.5.3 Триггер

Осциллограф обычно применяется как инструмент для измерения, а не для мониторинга электрических величин. Несмотря на это, в некоторых современных осциллографах может быть встроенный триггер, так, что он может быть использован для хранения данных, представляющих особый интерес, например, волновые формы пиков напряжения, измеренных в переходных режимах, таких как разгон и торможение. Дополнительную информацию по этой теме можно найти в руководстве по эксплуатации прибора.

10 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Быстрое развитие силовой электроники позволило применять асинхронные электродвигатели не только в традиционных решениях с фиксированной скоростью вращения, но и с успехом использовать их в системах регулирования скорости. В таких системах двигатель должен управляться от статического преобразователя частоты, а не от линии электропередачи.

Использование электродвигателей с короткозамкнутым ротором в паре с преобразователем частоты имеет большие преимущества в отношении затрат и энергоэффективности, по сравнению с другими промышленными решениями регулирования скорости. Тем не менее, преобразователь влияет на характеристики электродвигателя и может наводить помехи в питающую электросеть.

Постоянное увеличение числа приложений с асинхронными электродвигателями, питаемыми от ШИМ преобразователей частоты, с регулируемой скоростью, требует хорошего понимания всей системы электропитания, а также взаимодействия между ее отдельными частями (линия электропитания - преобразователь частоты - асинхронный двигатель - нагрузка).

Данное техническое руководство направлено на прояснение основных аспектов применения асинхронных электродвигателей со статическими преобразователями частоты, представляя теоретические основы и практические критерии по конкретным темам, отталкиваясь от исследований и опыта технического персонала WEG.

Следует, наконец, отметить, что представленные здесь критерии, не являются постоянными. Как и любая технология, они могут измениться вместе с разработкой новых материалов. Таким образом, представленные здесь критерии могут быть изменены без предварительного уведомления и поэтому важно, чтобы этот документ регулярно пересматривался и обновлялся.