

# Предотвращение аварий двигателя при его удаленном подключении к преобразователю частоты на IGBT.

Статья:

John Hibbard

Nicholas Hayes

Редакция, дополнение:

## Вступление

Применение нового поколения преобразователей частоты, (ПЧ, или инверторов), использующих в своем составе Биполярные Транзисторы с Изолированными Затворами (IGBT) для подключения удаленных двигателей, всегда являлось источником беспокойства и дополнительных расходов. Двигатели, подключенные к ПЧ и установленные на значительном расстоянии от него, часто выходят из строя из-за пробоя изоляции, вызванного импульсными перенапряжениями. В этой статье приведен краткий анализ существующих проблем. Здесь также приводятся примеры решений, устраняющих существующие проблемы и предотвращающих аварии двигателей в процессе их длительной эксплуатации.

## Описание проблемы

Часто существует необходимость разнесения инвертора и управляемого им двигателя на большое расстояние друг от друга. Пример: двигатели насосов, установленных в скважинах, должны управляться с поверхности: чем глубже скважина, тем длиннее кабель между двигателем и инвертором. На некоторых предприятиях, двигатели могут работать при тяжелых условиях окружающей среды. Однако, чувствительная электроника ПЧ может не вынести этих условий, что приводит к необходимости увеличения расстояния между центром управления, содержащим инвертор и двигателем, которым он управляет. В случае конвейеров и прессов часто имеется только один ПЧ, который управляет

несколькими двигателями, размещенными по всей длине конвейера. Длина конвейера часто диктует необходимость больших расстояний между двигателями и инвертором.

Большинство производителей ПЧ оговаривают максимально допустимое расстояние между двигателем и инвертором. Ограничения, вызванные этой величиной часто приводят к трудностям в применении, бесполезности, или невыполнимости задачи. Максимально допустимые расстояния разнятся у производителей, но все они лежат в пределах 30 – 80 м. Многие из пользователей ПЧ ставят перед выбором, или, скорее, вынуждены игнорировать требования к максимально допустимым расстояниям. Такие пользователи, спустя 2 недели, 6 недель, или 6 месяцев эксплуатации двигателя, вынуждены его перематывать, или менять на новый. В некоторых случаях, двигатель может выйти из строя даже при соблюдении требования по расстоянию, но близости его значения к максимально допустимой величине. Естественно, возрастают как затраты на ремонт, так и расходы, вызванные простоем оборудования.

## Напряжение ШИМ

ПЧ генерируют на выходе необходимые базовые напряжение и частоту, используя технологию, известную как “Широтно-Импульсная модуляция” (ШИМ). Для класса инверторов 380В, типовое базовое напряжение составляет от 0 до 380В а базовая частота изменяется от 0 до 50Гц. В выходной цепи инвертора находятся “переключающие” транзисторы, работающие на высокой скорости и создающие несущую частоту, поверх которой формируются необходимые базовые напряжение и частота. Принцип этого переключения совершенно аналогичен АМ или FM радиопередаче, в которой полезная информация, в виде музыки или речи, передается на радиоприемник на какой-то заданной радиочастоте. Несущая частота, или частота переключения, используемая для ПЧ на базе IGBT, обычно составляет от 1 до 20 кГц.

Время переключения – это время, которое требуется IGBT инвертору на переход из состояния “выключен” (высокое сопротивление) к состоянию “включен” (низкое сопротивление), и наоборот. Для IGBT последнего поколения, время переключения варьируется в диапазоне от 100 до 200 наносекунд (нсек). Поскольку эти устройства используются в цепях постоянного тока инвертора напряжением, приблизительно 650 В, для класса инверторов на 380 В, скорость изменения напряжения в единицу времени, (dV/dT), может превосходить 7500 вольт за микросекунду, (В/мксек).

## IGBT

Сравнительно недавнее появление IGBT, работающих на больших напряжениях и токах, вызвало широкое применение этих устройств в качестве силового переключающего элемента в преобразователях постоянного в одно- или трехфазный переменный ток в ПЧ, использующих Широтно-Импульсную Модуляцию. Фактически, все производители данного рода продукции уже разработали, или разрабатывают, линейки элементов, применяемых в этих относительно новых устройствах. Одной из главных причин для широкого использования IGBT, является их экстремально малое время переключения. В результате этого, в элементе очень малы потери на передачу и, следовательно, высока эффективность их применения в схеме. Кроме того, быстрое время переключения позволяет поднимать несущую частоту ПЧ выше слышимого диапазона. (Схемы с малыми несущими частотами, работающие в диапазоне от 1 до 2кГц, часто вызывают раздражающий ухо механический шум в двигателе.)

## Явление отраженной волны

Отражение волны напряжения – это явление, вызванное высокой скоростью нарастания напряжения, (dV/dT), и длиной кабеля подключения двигателя, который работает как передающая линия. Из-за несоответствия импеданса на разных концах кабеля, (кабель - инвертор и кабель - двигатель), высокочастотная часть волны, достигнув обмоток двигателя, отражается назад, к источнику, от которого она была послана. Поскольку отраженные пики накладываются на приходящие пики волны, их величины складываются, вызывая выбросы напряжения (См. рис.1). При увеличении несущей частоты, большее число пиков “накладывается” друг на друга одновременно, вызывая большее количество выбросов напряжения в единицу времени.

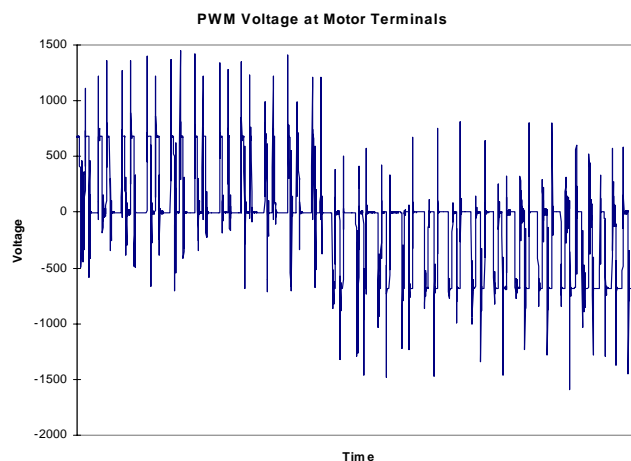


Рис. 1.

Величина отражения пиков напряжения зависит от входных волновых сопротивлений кабеля и двигателя и описывается коэффициентом отражения. Во сколько раз пиковое напряжение на обмотке двигателя будет выше напряжения постоянной цепи инвертора, определяется именно этим коэффициентом.

Формула 1

$$\text{Кoeff. отражения} = \frac{Z_{\text{д}} - Z_{\text{к}}}{Z_{\text{д}} + Z_{\text{к}}} = \rho$$

Где  $Z_{\text{д}}$  - волновой импеданс двигателя

$Z_{\text{к}}$  - волновой импеданс кабеля

Типовые коэффициенты отражения при удаленном подключении различных двигателей приведены ниже.

Двигатель	$\rho$
< 18,5 кВт	>0,9
37 кВт	0,83
75 кВт	0,76
160 кВт	0,65
300 кВт	0,52

Обратите внимание, что процент отражения больше для малых двигателей, чем для больших. Пиковое напряжение на терминалах двигателя будет равно величине напряжения в цепи постоянного тока, умноженной на коэффициент отражения.

Пиковое напряжение на терминалах двигателя =  $U_{\text{пост}}(1 + \rho)$

Если бы форма волны напряжения была бы правильной формы с постоянным периодом следования, было бы возможно “настроить” длину кабеля, исключив интерференцию волн. Однако, поскольку в волне, создаваемой с помощью ШИМ, ширина импульсов меняется, не представляется возможным найти некие нулевые точки вдоль всей длины кабеля, в которых без угрозы аварии может быть подключен двигатель.

## Явление резонансной цепи

Другим способом анализа проблемы является рассмотрение резонанса в системе. Поскольку многожильный соединительный кабель содержит как распределенную последовательную индуктивность, так и распределенную параллельную емкость, проводник может рассматриваться как резонансный колебательный контур. (См. рис 2.)

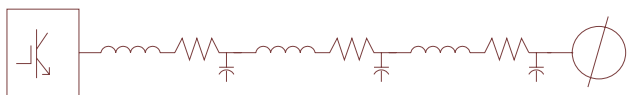


Рис. 2.

Зная индуктивность, (L), и емкость, (C), можно рассчитать собственную резонансную частоту для схем любого вида. При росте длины кабеля, L и C также возрастают, снижая резонансную частоту, как видно из Формулы 2:

$$Fr = \frac{1}{2 * 3.14159 * \sqrt{L * C}}$$

В тех случаях, когда физическая длина проводника, подключенного к двигателю, превышает 25м, значения L и C ограничивают диапазон собственной резонансной частоты между 2 и 5 МГц, в зависимости от характеристики кабеля. Если же длина больше, чем 80м, резонансная частота будет снижена уже до 500 кГц - 1.5 МГц. Эти частоты собственного резонанса примерно равны, или ниже, чем высокочастотные составляющие формы волны сигнала напряжения, формируемого схемами IGBT инвертора. (Спектральный анализ формы волны сигнала напряжения, формируемого составными IGBT инвертора, покажет частотные составляющие, находящиеся в диапазоне от 1 до 2 МГц). Более того, даже если частота собственного резонанса проводников далека от частотного диапазона формирования формы сигнала напряжения транзисторами IGBT, сами проводники имеют резонанс. Резонанс в проводниках приводит к “Усилению”, или росту составляющих напряжения на частотах, близких, к частоте собственного резонанса проводников. В результате, напряжение в переходных точках может принимать пиковые значения. Эти пики напряжения по величине могут в 2 - 2.5 раза превосходить напряжение в постоянной цепи инвертора. (См. рис 3.)

Bode Plot of 100 ft. long motor leads

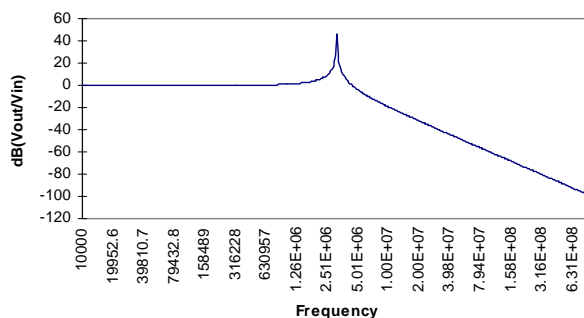


Рис. 3.

## Выбросы напряжения

Для класса 380 В, обычно на терминалах двигателя можно обнаружить пики напряжения в диапазоне между 1200 и 1550 В. (Класс 575/600В еще более уязвим, поскольку усиление пикового напряжения тем больше, чем выше напряжение в контуре.)

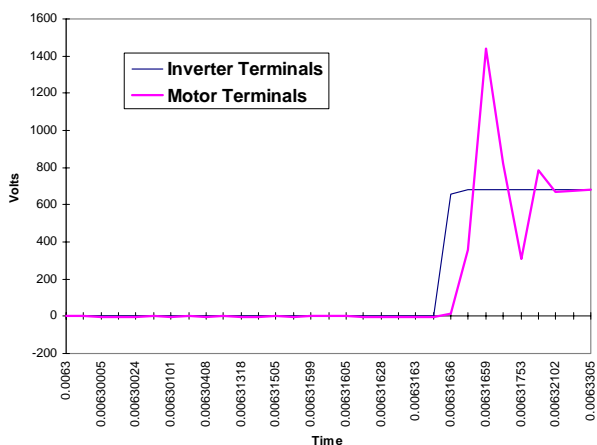


Рис 4.

Кроме того, вспомним, что эти пиковые значения могут иметь скорость нарастания,  $dV/dT$ , превосходящую 7500 В/мксек. Это может иметь исключительно пагубный эффект для обмоток двигателя и для изоляции системы в целом, часто приводя к преждевременному выходу двигателя из строя. Большинство изготовителей двигателей считает, что можно значительно увеличить срок службы, если одновременно ограничить амплитуду пикового напряжения до уровня в 1000В и величину  $dV/dT$  на терминалах двигателя до 1000 В/мксек.

## Поверхностный эффект, приводящий к потерям

Кроме проблем, описанных выше, существует еще один феномен, которого следует опасаться: поверхностный эффект. Поверхностный эффект – это физическое явление, заставляющее переменный ток протекать по внешней поверхности проводника. Этот феномен вызван тем, что сопротивление проводника прямо пропорционально квадратному корню частоты протекающего тока. Другими словами, чем больше частота, тем больше величина сопротивления, что приводит к возникновению поверхностного эффекта. Несущие частоты ШИМ находятся в диапазоне от 800 Гц до 20 кГц, и течение токов на таких частотах приводит к потерям  $I^2R$ . В то время, как величины токов на таких частотах относительно близки к номинальным, потери мощности пропорциональны квадрату токов. Зависимость потерь от квадратного корня частоты также значительна, поскольку частоты имеют достаточно большие значения. Геометрия пластин ротора также в большой степени определяет уровень потерь в роторе из-за поверхностного эффекта.

## Аварии двигателей

### Сравнение перенапряжения с тестом изоляции двигателя

Все производители двигателей и других электромагнитных устройств, таких, как генераторы, например, в процессе производства выполняют на своем оборудовании один или два диэлектрических теста с целью обнаружения нарушений изоляции в этих устройствах. Для класса оборудования 600В, эти тесты состоят в подаче на обмотки относительно высокого напряжения, величиной от 2500 до 3000 В, на короткий период времени. Такие типы тестов перегружают систему изолирующих компонентов, и, если применяются слишком часто, или в течение слишком длительного периода времени, разрушают изоляцию. Когда удаленное подключение двигателя приводит к возникновению перенапряжений, каждый пик перенапряжения действует подобно небольшому диэлектрическому тесту. При достаточном их количестве, происходит пробой в системе изоляции, и двигатель нуждается в замене или ремонте.

### Аварии из-за пробоя изоляции

Реже, чем у остальных, пробой изоляции происходят у больших двигателей. Причина в том, что они намотаны более “аккуратно”, что означает, что положение каждого витка провода в фазной обмотке точно контролируется при производстве. Поэтому, контролируется и уровень напряжения пробоя между соседними обмотками. Между тем, в малых двигателях, сечения проводов очень малы, а число витков, наоборот, велико. Как правило, обмотки таких двигателей наматываются случайным образом, без контроля за расстоянием между соседними витками. Поэтому, вполне вероятно наличие близко расположенных витков провода с большой разностью потенциалов, близкой к допустимому пределу изоляции. Даже если бы не было перенапряжений, наличие высокой скорости  $dV/dT$  само по себе может привести к пробоям изоляции и выходу двигателя из строя. Как правило, такие аварии случаются в течение первых часов или недель эксплуатации.

### Аварии из-за тлеющих разрядов (Явление короны)

С ростом величины напряжения, связанного с высокой скоростью нарастания  $dV/dT$ , увеличивается также и возможность возникновения тлеющих разрядов, или “короны”.

При возникновении короны вырабатывается низкостабильный озон, O<sub>3</sub>. Этот побочный продукт, являясь очень сильным окислителем, атакует и разрушает органические компоненты системы изоляции. Тлеющая корона легко возникает при высокой dV/dT и отсутствии контроля за перенапряжениями. Даже крупные двигатели, чье межвитковое напряжение контролируется “умной” намоточной техникой, не застрахованы от возникновения короны. Как результат, эффект тлеющей короны приводит к аварии двигателя.

## Проблемы с подшипниками.

Другая возможная проблема - это медленное разрушение шариков/роликов в подшипниках, которые поддерживают вал двигателя.

Данная проблема возникает из-за нарушения синфазности 3-х фазной сети, когда сумма мгновенных значений трех фазных напряжений на входе двигателя не равна нулю. Поэтому, относительно нулевой точки возникает некоторое сетевое напряжение. Линейное напряжение ШИМ всегда либо есть, либо отсутствует (время переключения транзисторов намного меньше, чем ширина импульса, и никоим образом не используется для обеспечения результирующего нулевого потенциала), поэтому не может обеспечить нуля относительно земли.

Подшипники двигателя создают цепь, обладающую свойствами электрической емкости. Конденсатор состоит из двух пластин с различными зарядами (напряжением). Если между пластинами может быть образовано электрическое поле, значит они обладают электрической емкостью. Как воздух, так и смазка могут использоваться в качестве диэлектрика, через который можно создать это поле. Если присутствует поле, справедлива следующая формула:

*Формула 3*

$$I = C \times dV/dt.$$

Это означает, что ток, протекающий через конденсатор (шарики, смазка и воздух, обойма подшипника) пропорционален скорости роста напряжения между пластинами и качества диэлектрика между ними, состоящего из смазки и воздуха. Когда у шариков/роликов происходит периодический контакт с металлическими кольцами обойм подшипника, конденсатор закорачивается, и через него течет электрический ток. Еще хуже, когда этот контакт пропадает, поскольку возникает электрическая дуга до тех пор, пока в течение некоего периода не истощится приложенная энергия. Происходит постепенное разрушение поверхностей качения подшипников, которое, по мере накопления, приводит поначалу к повышению шума двигателя, а затем и к выходу его из строя.

## Проблемы вибрации и шума.

Чтобы исключить проблемы с вибрацией и шумами, рекомендуется, чтобы у используемого двигателя не было компонентов, которые создавали бы резонанс на частотах, которые генерирует двигатель (и нагрузка) при работе. Это возможно в системах, где заранее известна частота питающей сети, например, 50Гц. Однако, сейчас у ПЧ нет стандартной несущей частоты, а базовая частота может меняться в диапазоне от 10% от 50 Гц до 100% от 50 Гц, и выше.

Вы должны учитывать, что при работе двигателя, разработанного для сети 50Гц на различных частотах питающего напряжения, некоторые компоненты двигателя, такие, как вал или вентилятор, например, могут войти в механический резонанс. У каждого компонента существует своя частота механического резонанса, и электрическая частота, приложенная к обмоткам и магнитопроводу ротора, вызывает механические вибрации, отличающиеся от расчетных. Когда вибрации, вызываемые электрической частотой совпадают с частотой собственного механического резонанса компонента, могут появиться серьезные проблемы, вплоть до разрушения этого компонента.

# Некоторые технические средства решения проблем удаленной нагрузки

## Использование дросселей переменного тока.

Подключение дросселя к выходным клеммам инвертора.

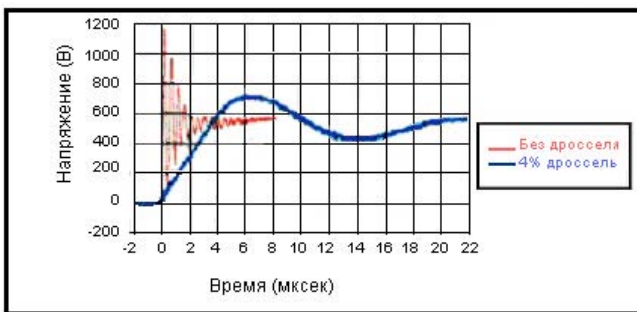
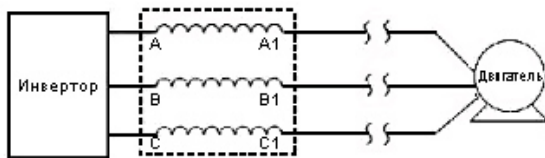


Рис 6.

Из вышеприведенной осциллограммы видно, что при подобном подключении дроссель выполняет функцию фильтра  $dV/dT$ , снижая скорость нарастания пиков перенапряжения в 2 – 2,5 раза до 700 в/мксек и, тем самым, позволяя увеличить длину кабеля к двигателю до 100м.

Швейцарская фирма Schaffner выпускает широкий спектр трехфазных дросселей (серии RWK 212, RWK 213 и RWK 312) намотанных на сердечнике, набранном из пластин трансформаторного железа, схожим по конструкции с обычными трансформаторами. Дроссель подключается к инвертору и двигателю с помощью встроенной клеммной колодки, либо, для больших мощностей, с помощью наконечников. Конструктивно дроссели выполнены без кожуха, что снижает их стоимость и позволяет встраивать в любые системы и шкафы. Для снижения шума при работе, витки дросселей пропитаны специальным лаком (См. рис.7, слева). Дроссели подбираются по номинальному току и индуктивности. Двумя самых распространенными типами по характеристике индуктивности при использовании в приводной технике, являются 4%

и 2% дроссели. Данная характеристика называется “падение напряжения при коротком замыкании” (так же, как и для трансформаторов).

Данная характеристика равна процентному значению падения напряжения на обмотках дросселя при номинальном токе и частоте, по отношению к входному напряжению.

Падение напряжения зависит как от резистивной, так и от индуктивной составляющей общего входного импеданса, но для дросселей доминирующим фактором является именно индуктивная составляющая, поскольку величина сопротивления обмоток очень мала, и поэтому, падение напряжения напрямую зависит от индуктивности обмоток на частоте 50Гц.

### Защита инвертора от короткого замыкания в двигателе

Зачастую, при коротком замыкании в обмотках двигателя на землю или между собой, силовые IGBT ключи инверторов выходят из строя. Хотя инвертор и имеет встроенную защиту по выходному току, ток короткого замыкания может иметь такую величину и скорость нарастания, что ключи будут выведены из строя до того, как успеет сработать схема защиты. Выходной дроссель ограничит

ток до безопасного значения и снизит скорость его нарастания. У инвертора будет больше времени, чтобы обесточить выходные цепи, и, хотя двигатель все равно будет нуждаться в ремонте, транзисторы привода останутся целы.

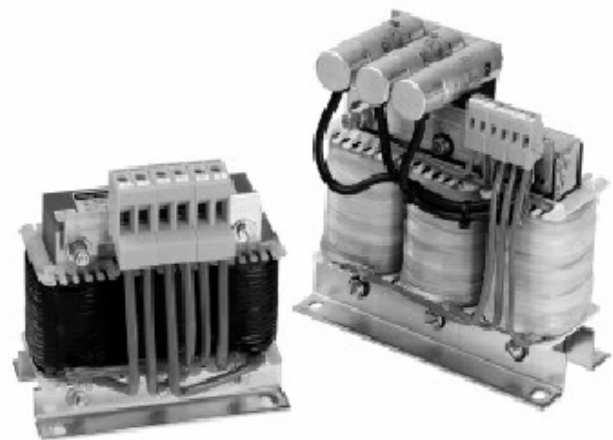


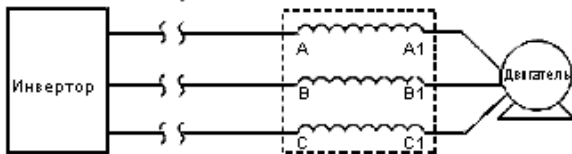
Рис 7.

### Выводы:

Конечно, дроссель, благодаря своей невысокой стоимости, является самым экономичным решением проблемы удаленного подключения двигателя. К сожалению, дополнительная индуктивность на выходе значительно снижает частоту резонанса цепи. (См. формулу 2, стр. 3, для расчета  $F_r$ ). Вследствие этого, возникают дополнительные потери на дросселе, как в обмотках, так и в железе. Кроме того, подобное

сглаживание несколько понижая величину пиков перенапряжений, также и увеличивает их длительность, вызывая дополнительную нагрузку на обмотки двигателя.

#### Подключение дросселя к клеммам двигателя.



При подобном подключении дроссель поглощает все пиковые перенапряжения и значительно снижает скорость их нарастания  $dV/dt$  на обмотках двигателя. Картина напряжения на клеммах двигателя, удаленного от инвертора на 300м, с подключенным к нему дросселем, показана на рис.8.

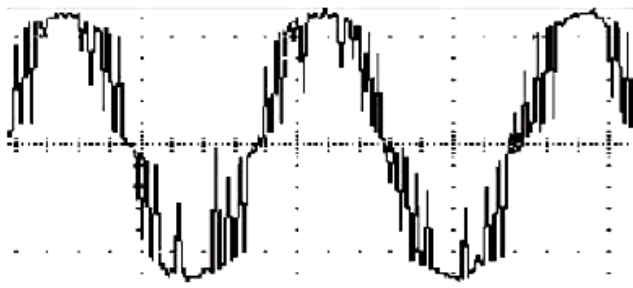


Рис 8.

Несущую частоту ШИМ рекомендуется снижать до значения 1-2кГц.

#### Выводы:

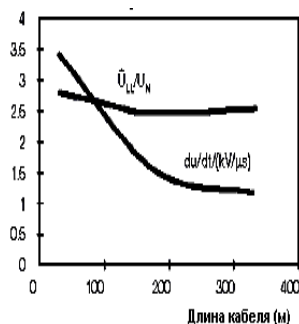
Поскольку и дроссели и обмотки двигателей состоят из одних и тех же материалов, дроссель переменного тока, установленный перед двигателем, превращается попросту в жертвенного агнца. Вполне очевидно, что он подвергается действию тех же самых пробойных перегрузок по напряжению, что и двигатель.

## Использование $dV/dt$ дросселей и фильтров.

$dV/dt$  дроссели схожи по конструкции с обычными сетевыми дросселями из предыдущего раздела, с тем отличием, что конструкция сердечника выполнена не из обычного трансформаторного железа, а из материала с лучшими характеристиками по магнитной индукции, что позволяет ему перемагничиваться на частотах, близких к частоте несущей ШИМ.

$dV/dt$  дроссели фирмы Schaffner (серия RWK 305) работают на частотах ШИМ 2-12кГц и обеспечивают снижение скорости нарастания пиков перенапряжения не менее, чем в 5 раз (см. графики на рис.9).

Без фильтра  $dV/dt$



С фильтром  $dV/dt$

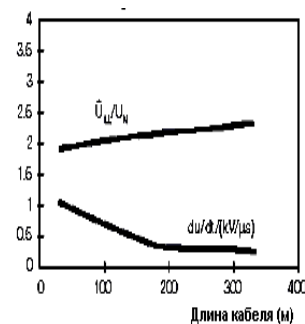


Рис 9.

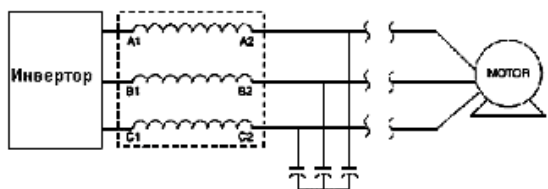
$dV/dt$  дроссели RWK 305 подбираются по номинальному току и имеют 0,8% характеристику по индуктивности.

При использовании подобных фильтров на выходе инвертора, возможно подключение двигателя на удалении 200 – 300 метров от инвертора.

#### Выводы:

Так как характеристика падения напряжения у  $dV/dt$  дросселей RWK 305 всего 0,8%, что в 5 раз меньше, чем на обычных моторных дросселях, то управление двигателем происходит практически без потери его крутящего момента. Позволяя значительно снизить скорость нарастания пиков перенапряжения и, тем самым, увеличить дальность подключения двигателя,  $dV/dt$  дроссели, тем не менее, не снижают в необходимой степени саму величину перенапряжения на обмотках двигателя, как это видно на графиках на рис.9.

## Синусные фильтры



Самая лучшая защита двигателя достигается при применении синусных фильтров. Этот LC фильтр, подключенный на выходе инвертора, превращает грубую форму напряжения ШИМ в вид, максимально близкий к синусоидальному (рис10.).

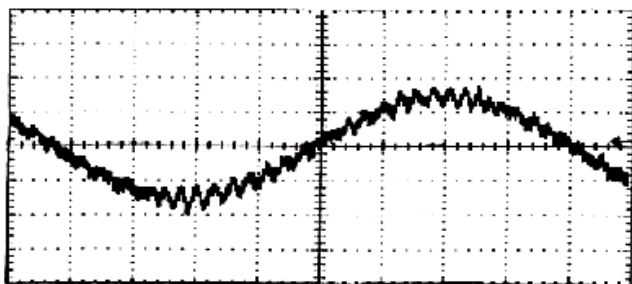


Рис 10.

Поскольку напряжение имеет синусоидальную форму, на терминалах двигателя исчезают все перенапряжения и  $dV/dT$ , что позволяет увеличивать длину кабеля к двигателю до 1 км. Кроме того, с исключением высокочастотной составляющей напряжения, снижается нагрев двигателя, что увеличивает срок его службы. Синус-фильтры, выпускаемые фирмой допускают настройку несущей частоты ШИМ в пределах 4-16 кГц.

Модели синус-фильтров Schaffner FN5010 (см. рис. 7, слева) имеют диапазон по номинальным токам от 2,5А до 610А, что позволяет использовать их для всей линейки низковольтных преобразователей частоты при частотах на двигателе до 70Гц. Серия FN5020 рассчитана на токи от 25 до 120А, но допускает работу на выходных частотах на двигателе до 600Гц.

При комбинации синус-фильтров FN5020 и FN5030 (последовательное подключение), фирма Schaffner декларирует бесконечное расстояние от инвертора до двигателя.

## Выводы: преимущества и недостатки

Разработчик системы всегда ищет наиболее экономичное решение проблем. На первый взгляд, использование дополнительных дросселей и фильтров увеличивает стоимость системы, не добавляя ей никаких дополнительных функций. Но данное удорожание должно противопоставляться целому списку преимуществ, сопровождающих эксплуатацию оборудования:

- Защита дорогостоящего преобразователя частоты от короткого замыкания в двигателе во время работы.
- Защита двигателя от специфических опасностей, возникающих для него при работе от преобразователя частоты и описанных выше.
- Защита от наводимых помех внешнего оборудования (теле-, радио- коммуникационного, а также различных измерительных систем с удаленными датчиками), находящегося в непосредственной близости от выходных силовых кабелей инвертора.
- Повышение общей надежности и долговечности эксплуатируемого оборудования, обеспечиваемое тремя предыдущими пунктами.