

Компания
ВЕСПЕР

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ

РОССИЙСКИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
преобразователей частоты с 1992 года

www.vesper.ru
+7 (495) 258 00 49



ЭФФЕКТИВНОЕ
управление
ЭЛЕКТРОприводом



Постоянное наличие на складах
в Москве и регионах

Бесплатная доставка по России

Широкая региональная сеть

Лучшая техническая поддержка в России

Преобразователи частоты: защита от короткого замыкания в нагрузке

Компания
ВЕСПЕР

В статье раскрывается механизм функционирования защиты от короткого замыкания выходных цепей в преобразователях частоты. Приведены практические рекомендации для безаварийной работы преобразователей частоты. Материал статьи основан на опыте эксплуатации преобразователей частоты компании «Веспер» и других производителей.

Компания «Веспер», г. Москва

Введение

Когда при коротком замыкании выходных цепей частотные преобразователи вопреки наличию функции защиты от КЗ выходят из строя, пользователи воспринимают это с недоумением. Непонимание причин, приводящих к выходу из строя частотный преобразователь, снабженный защитой от КЗ, требует дополнительно и пристально рассмотреть этот вопрос.

Настоящая статья представляет собой попытку сделать обзор и кратко изложить имеющуюся в открытом доступе многочисленную информацию об особенностях поведения выходного тока преобразователя частоты при коротком замыкании в нагрузке. Этот материал окажет помощь электротехническим службам предприятий в эксплуатации преобразователей частоты.

Стойкость к токовым перегрузкам и короткому замыканию — одно из важных требований, предъявляемых к современному промышленному электроприводу. При управлении электродвигателем преобразователь частоты непрерывно измеряет ток в каждой выходной фазе и, когда ток превышает установленное номинальное значение, выполняет действия по защите электропривода. Защитные функции, имеющиеся в преобразователе, эффективно срабатывают в различных аварийных ситуациях, в том числе при коротких замыканиях в цепях нагрузки (в силовом кабеле или электродвигателе).

Однако, несмотря на имеющуюся защиту от короткого замыка-

ния, выход из строя силовой части преобразователя возможен при некоторых экстремальных условиях. Токи перегрузок при замыканиях могут достигать значений, при которых существует такая опасность. Разрушительные последствия воздействия тока короткого замыкания могут быть различны (рис. 1).

IGBT-транзисторы, составляющие основу преобразователей частоты, по своей природе неспособны противостоять сверхтокам, возникающим при коротком замыкании.

Для того чтобы полупроводник не вышел из строя, внешняя схема управления силовым прибором

должна вовремя обнаружить сверхток и отключить его.

Различные токовые перегрузочные режимы преобразователей частоты при эксплуатации

Аварийные (перегрузочные) токовые режимы преобразователя частоты классифицируются в зависимости от степени превышения его выходного тока над номинальным значением и от скорости нарастания тока. Аварийные сообщения на дисплее преобразователя позволяют пользователю диагностировать причины токовых перегрузок.

Ниже рассмотрены действия преобразователя частоты и аварийные сообщения при перегрузках по току во время управления электродвигателем.

«Медленная» тепловая защита

При небольшом превышении выходного тока¹ — не более $(1,2...1,5) \times I_n$, в зависимости от модели преобразователя частоты — выходное напряжение отключается через некоторое время (от 1 до 8 мин в зависимости от уставки пользователя) и на дисплее появляются аварийные сообщения.

Например, в общепромышленном преобразователе модели EI-7011² сообщения следующие:



Рис. 1. Вверху — повреждение кристаллов IGBT; внизу — внешний вид вышедшего из строя преобразователя частоты

¹ Здесь и дальше — в главе «Быстрая» тепловая защита — речь идет о действующем значении переменного синусоидального тока за период основной частоты (до 50 Гц — для стандартного электродвигателя).

² Примеры приведены на основе преобразователей частоты компании «Веспер».



Рис. 2. Сообщение на дисплее преобразователя частоты EI-7011 при токовой перегрузке управляемого электродвигателя



Рис. 3. Сообщение на дисплее EI-7011 при токовой перегрузке преобразователя



Рис. 4. Сообщение на дисплее EI-7011 при коротком замыкании в нагрузке

► «OL1 (Over Load) Перегрузка двигателя» – текущее значение выходного тока преобразователя превысило уставку номинального тока электродвигателя, установленную пользователем в соответствии с паспортными данными примененного двигателя (рис. 2);

► «OL2 (Over Load) Перегрузка преобразователя» – текущее значение выходного тока преобразователя превысило значение его номинального тока, которое определяется номинальной мощностью преобразователя и пользователем изменено быть не может (рис. 3). Появление этого сообщения свидетельствует о том, что мощность примененного электродвигателя либо преодолеваемая им механическая нагрузка являются предельными для данного преобразователя частоты.

Наращение тока может происходить медленно (в течение нескольких минут) или быстро (за секунды). Протекающий повышенный ток может быть относительно стабильным или изменяющимся (что бывает как правило). Решение об аварийном останове двигателя и отключении выходного напряжения принимается процессором преобразователя частоты на основе измерения выходного тока за некоторый промежуток времени, например за 1 мин.

Возможная причина – повышенная механическая нагрузка на валу электродвигателя в результате:

- нарушения технологического процесса вследствие перегрузки рабочего механизма;
- недостаточной мощности выbranного электродвигателя;

► появления повышенного момента сопротивления в самом электродвигателе (например, в подшипниках) или в сопряженном с ним механизме;

- других обстоятельств.

«Быстрая» тепловая защита

Когда выходной ток достигает значения $1,8 \times I_n$, преобразователь быстро (в течение 1–2 секунд) отключает выходное напряжение – это «быстрая» тепловая защита. Аварийное сообщение при этом, например в том же преобразователе частоты EI-7011, выглядит так:

«OC (Over Current) Перегрузка по току». Это означает, что текущее значение выходного тока преобразователя достигло приблизительно двукратного (точнее – 1,8 раза) значения его номинального тока.

Возможная причина – резкое увеличение механической нагрузки в результате:

- заклинивания вала электродвигателя из-за поломки или разрушения сопряженного с ним механизма;
- попытки плавно разогнать электродвигатель, вращающийся по-сторонней силой в обратную сторону (например, электродвигатель вентилятора, вращаемого потоком воздуха), – режим противовключения;
- попытки преобразователя пустить застопоренный какой-либо внешней силой электродвигатель;
- прочих причин.

Мгновенная защита

Мгновенное (от долей микросекунды до нескольких микросекунд) нарастание импульсного тока в выходных цепях преобразователя

до значений, превышающих номинальное значение примененного IGBT-модуля в несколько раз, в результате короткого замыкания.

В случае обнаружения короткого замыкания в выходных цепях преобразователя частоты мгновенно (за время не более 10 мкс) отключает выходное напряжение. При этом в той же модели преобразователя частоты EI-7011 выдается сообщение:

«SC (Short Circuit) Короткое замыкание в нагрузке» (рис. 4).

Причины мгновенного нарастания импульсного тока, происходящие при этом физические процессы в IGBT-транзисторах и работа функции защиты от короткого замыкания в выходных цепях преобразователя частоты изложены ниже.

Аварийные режимы работы преобразователя частоты при коротком замыкании выходных цепей

Аварийные режимы работы IGBT-транзисторов при коротком замыкании выходных цепей в зависимости от места и момента его возникновения могут быть следующими.

Короткое замыкание на выходе преобразователя частоты (или в непосредственной близости от его выходных клемм)

Может возникнуть, например, при нарушении норм электромонтажа, механическом или другом повреждении силового кабеля, повлекшем замыкание фаз между собой либо на корпус.

Скорость нарастания тока при коротком замыкании выхода в первом приближении определяется ин-

дуктивностью петли короткого замыкания (паразитной индуктивностью шин или проводов до точки замыкания) и напряжением питания выходных IGBT-модулей [3].

Пример 1.

Определим скорость нарастания тока при коротком замыкании выхода, приняв реальные параметры, например:

$U = 540 \text{ В}$ – напряжение питания на IGBT-транзисторах,

$L = 0,21 \text{ мкГн}$ – паразитная индуктивность петли короткого замыкания [9].

Скорость нарастания при данных параметрах составляет:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{U}{L} = \frac{510}{0,21 \times 10^{-6}} = 2571 \text{ А/мкс. (1)}$$

Таким образом, скорость нарастания тока при коротком замыкании выхода преобразователя весьма велика: за время меньше одной микросекунды ток достигает значения, превышающего номинальное в несколько раз. IGBT-транзистор при таком токе, вероятнее всего, будет разрушен даже при исправной защите от короткого замыкания, время срабатывания которой значительно больше длительности процесса нарастания тока – примерно 10 мкс.

В зависимости от момента возникновения можно выделить два типа короткого замыкания, различающихся соответственно особенностями протекания тока и степенью токовой нагрузки IGBT-транзистора [3].

Тип 1. IGBT-транзистор включается (открывается) на уже имеющееся короткое замыкание в нагрузке.

В этом случае скорость возрастания тока короткого замыкания в выходной цепи транзистора определяется индуктивностью петли короткого замыкания и характеристиками управляющего напряжения на входе IGBT-транзистора – длительностью фронта, уровнем напряжения управления на затворе и др.

Ток коллектора транзистора после момента замыкания возрастает по закону интегрирования в индуктивной нагрузке, затем значение тока стабилизируется: ток дальше не рас-

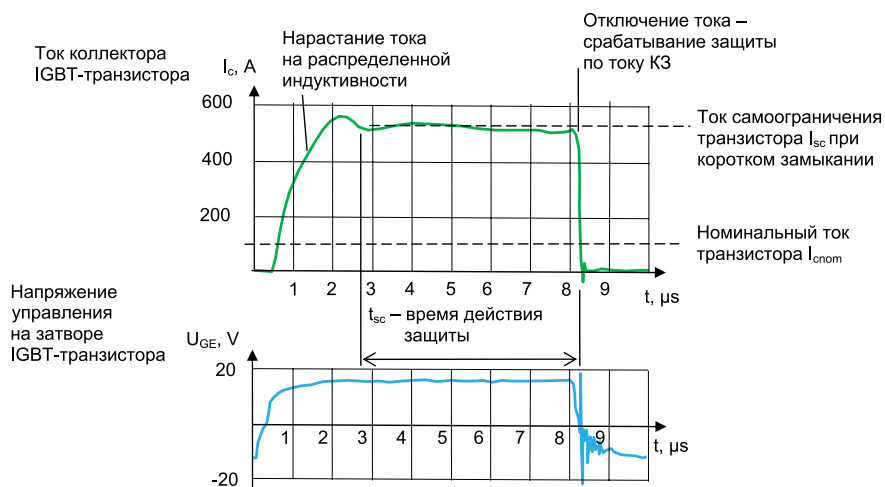


Рис. 5. Ток IGBT-транзистора при коротком замыкании первого типа

тет, транзистор входит в режим самоограничения.

Например, для IGBT-модуля SKM 100GB123D производства Semikron график тока коллектора при замыкании первого типа выглядит, как показано на рис. 5.

При протекании тока короткого замыкания в режиме самоограничения на транзисторе выделяется большая пиковая мощность, происходит его разогрев, и существует реальная опасность его разрушения.

Для того чтобы не произошло теплового разрушения транзистора, длительность тока короткого замыкания должна быть ограничена: для большинства IGBT-модулей она не должна превышать 10 мкс.

Через время, не превышающее 10 мкс, в управляющем драйвере сра-

батывает быстродействующая защита и путем выключения управляющего сигнала прекращает протекание тока в транзисторе.

Следует также отметить, что количество импульсов короткого замыкания, которое способен выдержать современный IGBT-транзистор до разрушения, ограничено и существенно зависит от условий, при которых короткое замыкание происходит.

При предельных режимах работы IGBT-транзистора допустимое количество коротких замыканий – порядка 10 раз [8].

Следующий тип короткого замыкания нагрузки создает наиболее тяжелый режим для IGBT-транзистора.

Тип 2. Короткое замыкание на выходе преобразователя происходит

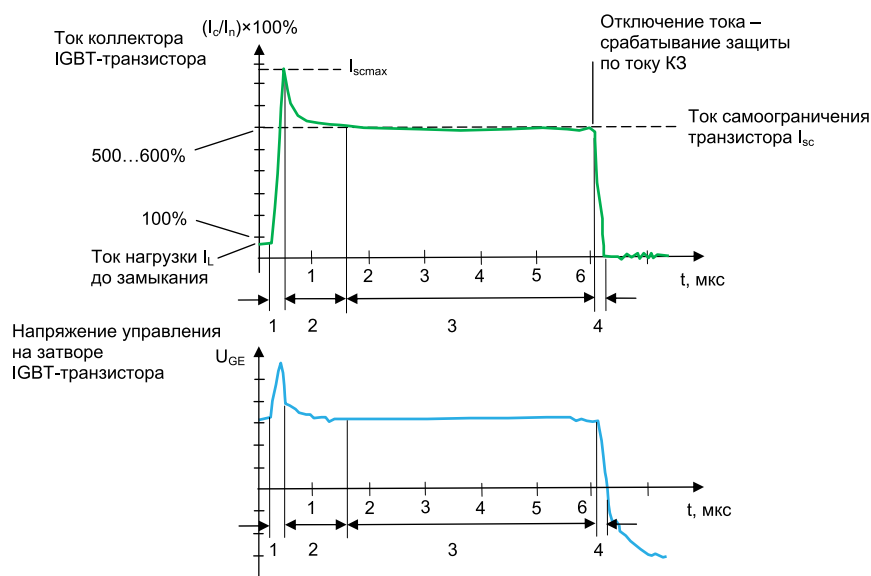


Рис. 6. Ток IGBT-модуля при коротком замыкании типа 2

после того, как IGBT-транзистор уже включен.

Другое его название – «жесткий» режим короткого замыкания [6]. При этом IGBT-транзистор подвергается большим перегрузкам. Характеристики процесса при коротком замыкании типа 2 выглядят, как показано на рис. 6 [3].

При «жестком» коротком замыкании ток коллектора резко увеличивается за доли микросекунды (участок 1 на диаграмме тока коллектора). Процесс нарастания тока в этой фазе неуправляем. Ток транзистора возрастает до весьма высокого уровня $I_{сmax}$, и IGBT-транзистор при таком токе может перегреться и выйти из строя за время меньше 1 мкс, то есть еще до начала действия функции защиты, длительность срабатывания которой составляет ≈ 10 мкс.

Если разрушения IGBT-транзистора не произошло, то после завершения фазы (участок 1) ток короткого замыкания коллектора снижается (участок 2) до стационарного уровня тока самоограничения (участок 3). После срабатывания защиты по короткому замыканию идет фаза выключения тока коллектора (участок 4).

Случаи короткого замыкания на практике

Короткое замыкание на выходных клеммах преобразователя частоты или в непосредственной близости от клемм на практике маловероятно. Наиболее распространен случай короткого замыкания силового кабеля вблизи электродвигателя в результате механического либо другого повреждения кабеля или непосредственно в его клеммной коробке, например, в результате нарушения правил монтажа. Другой распространенный случай – межвитковое замыкание в обмотках электродвигателя.

Физические процессы, происходящие в реальных случаях коротких замыканий, такие же, как и рассмотренные выше (см. пример 1, короткое замыкание типа 1 и короткое замыкание типа 2). Отличия заключаются лишь в том, что от выходных клемм преобразователя частоты до места короткого замыкания имеется отрезок кабеля длиной от нескольких до десятков (или сотен) метров, обладающий распределенной индуктивностью (рис. 7).

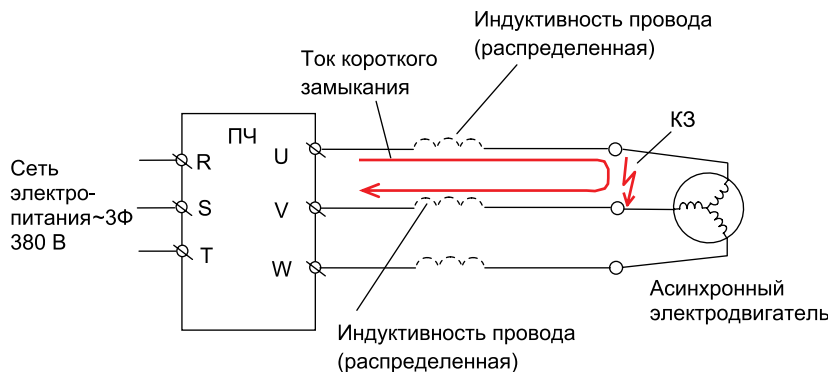


Рис. 7. Эквивалентная схема короткого замыкания

В результате дополнительная эквивалентная индуктивность цепи в петле короткого замыкания уменьшает скорость нарастания тока коллектора IGBT-транзистора.

Чтобы оценить, как влияет длина кабеля на уменьшение скорости нарастания тока, рассмотрим следующий пример, отражающий средние условия функционирования преобразователя частоты.

Пример 2.

Мощность преобразователя частоты – 37 кВт.

Короткое замыкание в клеммной коробке электродвигателя.

Длина кабеля от ПЧ до двигателя – 10 м.

Распределенная индуктивность кабеля – 0,26 мкГн/м (примерное значение для силового кабеля, диаметр жилы (d) которого составляет 16 мм [7]).

При коротком замыкании скорость нарастания тока в цепи будет определяться эквивалентной индуктивностью кабеля до точки замыкания и составит:

$$\frac{di(t)}{dt} \approx \frac{U_m}{L} = \frac{540 \text{ В}}{2 \times 0,26 \times 10 \times 10^{-6} \text{ Гн}} = 104 \times 10^6 \text{ А/с} = 104 \text{ А/мкс. (2)}$$

При такой скорости нарастания за 10 мкс (время срабатывания защиты по короткому замыканию) ток IGBT-транзистора возрастет на 1040 А, если не наступит режима самоограничения.

В IGBT-транзисторах, применяемых в преобразователе частоты мощностью 37 кВт (например, в IGBT-модуле SKM150GB123D с номинальным током 150 А, допу-

стимым током короткого замыкания $6 \times I_{ном} = 900 \text{ А}$ и импульсом тока короткого замыкания длительностью не более 10 мкс [11]) при скорости нарастания 104 А/мкс достигнутый за несколько микросекунд уровень тока однозначно приведет к возникновению режима самоограничения, и нахождение IGBT-транзистора при токе самоограничения 900 А может создать опасность его перегрева и выхода из строя.

Таким образом, в условиях, приведенных в примере, у преобразователя частоты мощностью 37 кВт при коротком замыкании в клеммной коробке электродвигателя отрезок кабеля длиной 10 м не защищает IGBT-транзисторы от токовой перегрузки. При этом выход из строя IGBT-модуля при коротком замыкании цепей в клеммной коробке электродвигателя вполне вероятен.

Но если длина кабеля составляет несколько десятков метров, что достаточно распространено на практике, то скорость нарастания тока еще более снижается. Рассмотрим следующий пример, где учтено данное обстоятельство.

Пример 3.

Мощность преобразователя частоты – 37 кВт.

Короткое замыкание в клеммной коробке электродвигателя.

Длина кабеля от ПЧ до двигателя – 50 м.

Распределенная индуктивность кабеля – 0,26 мкГн/м (примерное значение для силового кабеля, диаметр жилы (d) которого составляет 16 мм [7]).

При коротком замыкании скорость нарастания тока в цепи будет определяться эквивалентной индук-

тивностью кабеля до точки замыкания и составит:

$$\frac{di(t)}{dt} \approx \frac{U_m}{L} = \frac{540 \text{ В}}{2 \times 0,26 \times 50 \times 10^{-6} \text{ Гн}} = 20,8 \times 10^6 \text{ А/с} = 20,8 \text{ А/мкс. (3)}$$

Как видно из (3), за время 10 мкс ток возрастет на 208 А. Даже если до момента короткого замыкания текущий ток IGBT-транзистора был равен номинальному, то есть составлял 150 А, то достижение током значения $150 \text{ А} + 208 \text{ А} = 358 \text{ А}$ не представляет опасности для транзистора. Защита от короткого замыкания отключит протекающий ток и предотвратит разрушение.

Защита преобразователя частоты от токов короткого замыкания с помощью выходного фильтра du/dt

На практике эффективной защитой преобразователя частоты от короткого замыкания цепей нагрузки может стать выходной фильтр du/dt (рис. 8), представляющий собой трехфазную катушку, намотанную на магнитный сердечник и включенную между преобразователем частоты и электродвигателем (рис. 9).

Выходной фильтр du/dt (другое его название – моторный дроссель) выполняет несколько задач [10]:

- ▶ подавляет высокочастотные гармоники, образующиеся в токе электродвигателя и вызывающие дополнительный его нагрев;
- ▶ компенсирует емкостные токи моторных кабелей, которые могут вызвать ложное срабатывание защиты в преобразователе частоты, особенно при больших длинах кабелей;
- ▶ снижает амплитуду выбросов напряжения на электродвигателе, которые могут привести к пробое изоляции обмоток;
- ▶ в части токовой защиты – уменьшает скорость нарастания аварийного тока короткого замыкания и способствует задержке достижения максимального уровня тока КЗ. Наивысшее значение тока короткого замыкания в условиях применения выходного фильтра du/dt в действительности значительно (в десятки раз) меньше максимальной величины тока без фильтра.



Рис. 8. Выходной фильтр du/dt

В случае внезапного КЗ в выходных цепях преобразователя частоты ток короткого замыкания нарастает постепенно из-за наличия индуктивности фильтра в контуре тока.

Для эффективного функционирования выходной фильтр du/dt должен быть установлен непосредственно после выходных силовых клемм преобразователя частоты (рис. 10).

Оценим, насколько уменьшается скорость нарастания тока при коротком замыкании в клеммной коробке электродвигателя при наличии выходного фильтра (см. исходные данные примера 2).

Пример 4.

Мощность преобразователя частоты – 37 кВт.

Длина кабеля от ПЧ до двигателя – 10 м.

Распределенная индуктивность кабеля – 0,26 мкГн/м.

Выходной фильтр du/dt – 37 кВт; 0,12 мГн.

Скорость нарастания тока в цепи короткого замыкания при наличии выходного фильтра будет равна:

$$\frac{di(t)}{dt} \approx \frac{U_m}{L} = \frac{540 \text{ В}}{2 \times 0,26 \times 10 \times 10^{-6} \text{ Гн} + 2 \times 0,12 \times 10^{-3} \text{ Гн}} = 2,2 \times 10^6 \text{ А/с} = 2,2 \text{ А/мкс. (4)}$$

За время 10 мкс при скорости нарастания 2,2 А/мкс ток IGBT-транзистора вырастет примерно на 22 А, что вполне безопасно для IGBT-модуля SKM150GB123D.

Выводы

Проанализировав процессы, происходящие в преобразователях частоты при токовых перегрузках и коротком замыкании выходных цепей, можно сделать следующие выводы.

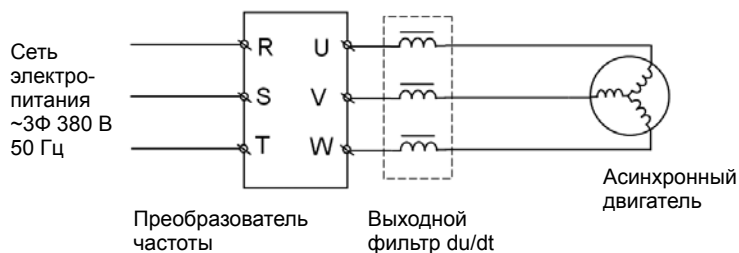


Рис. 9. Подключение выходного фильтра du/dt

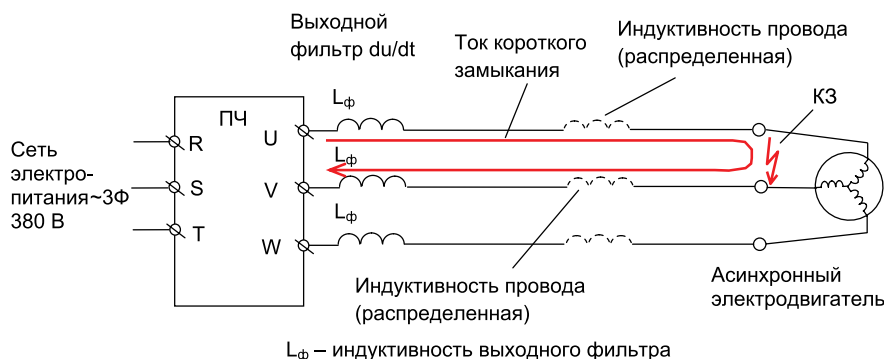


Рис. 10. Эквивалентная схема короткого замыкания при наличии выходного фильтра du/dt

Для предотвращения выхода из строя при коротком замыкании нагрузки в ПЧ имеется встроенная защита, но ее быстродействия может оказаться недостаточно.

Короткое замыкание выходных цепей преобразователя частоты – вполне вероятная на практике аварийная ситуация. Для предотвращения выхода из строя в преобразователе частоты имеется встроенная защита.

Но быстродействия защиты (5...10 микросекунд) может оказаться недостаточно, так как при коротком замыкании ток за время от долей микросекунд до десятков микросекунд возрастает до опасного значения, превышающего номинальный ток IGBT-транзисторов в несколько раз, что может привести к выходу преобразователя из строя.

Для предотвращения выхода из строя при коротком замыкании нагрузки в преобразователе частоты имеется встроенная быстродействующая защита, время действия которой составляет 5...10 микросекунд.

Одним из основных параметров, определяющих скорость нарастания тока при коротком замыкании, является индуктивность силового кабеля, напрямую зависящая от его геометрической длины.

Практические рекомендации для предотвращения аварий частотных преобразователей при случайных коротких замыканиях выходных цепей:

1) при достаточно длинных силовых кабелях эквивалентной индуктивности в петле короткого замыкания достаточно для того, что-

бы защита от короткого замыкания гарантированно сработала и защитила преобразователь частоты;

2) при малых длинах кабеля его индуктивности не хватает для эффективного снижения скорости нарастания тока короткого замыкания и велика вероятность повреждения преобразователя частоты. Именно в таких ситуациях чаще всего и происходят выходы преобразователей частоты из строя.

Действенной мерой, позволяющей повысить эффективность токовой защиты преобразователя от короткого замыкания, является установка выходного фильтра du/dt между преобразователем частоты и электродвигателем.

В современных преобразователях частоты защита от токов короткого замыкания не является абсолютной. Но при выполнении приведенных выше рекомендаций вероятность выхода из строя преобразователей частоты при коротком замыкании будет на практике сведена к минимуму.

Литература

1. Рекомендации по эксплуатации и монтажу IGBT-модулей // ОАО НПО «Энергомодуль»: [сайт]. URL: <http://energomodul.ru/rekomendacii> (дата обращения: 05.05.2016).
2. Худяков В. Школа MATLAB. Урок 5. Анализ свойств силовой электроники

в частотной области // Силовая электроника. 2006. № 1.

3. Принципы работы мощных MOSFET и IGBT-транзисторов // Рынок микроэлектроники: [сайт]. URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/transistor/igbt_semi/4_6_2.htm (дата обращения: 05.05.2016).

4. Колпаков А. Особенности применения драйверов MOSFET и IGBT // Компоненты и технологии. 2000. № 6.

5. BSM300GB120DLC Datasheet (характеристики IGBT-модуля) // Datasheet Archive: [сайт]. URL: <http://www.datasheetarchive.com/BSM300GB120DLC-datasheet.html>

6. Крапп Й. Защитные функции современных драйверов IGBT / Пер. с нем. А. Колпакова // Силовая электроника. 2010. № 5.

7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат. 1986.

8. Гутсманн Б., Канишат П., Мюнцер М., Пфаффенленер М., Ласка Т. / Пер. с нем. А. Колпакова. Режим повторяющегося короткого замыкания в Trench IGBT-структурах // Компоненты и технологии. 2010. № 8.

9. Колпаков А., Йохим Л. Проблемы проектирования IGBT-инверторов: перенапряжения и снабберы // Компоненты и технологии. 2008. № 5.

10. Моторные дроссели // Техпривод [сайт]. URL: <http://tehprivod.ru/katalog/preobrazovateli-chastoty/aksessuary-dlyapch/motornye-drosseli.html>

11. Бормотов А., Мартыненко В., Мускатиньев В. Некоторые вопросы эксплуатации IGBT силовых модулей // Компоненты и технологии. 2005. № 5.

И.Б. Барутсков, ведущий инженер,
Е.В. Цыганков, директор,
компания «Веспер», г. Москва,
тел.: +7 (495) 258-0049,
e-mail: mail@vesper.ru,
www.vesper.ru