

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ: ЗАЩИТА ОТ КЗ В НАГРУЗКЕ

**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.**

## 1. Введение

Факты выхода из строя частотных преобразователей при коротком замыкании выходных цепей и при наличии функции защиты от короткого замыкания вызывают недоумение пользователей, эксплуатирующих частотные преобразователи.

Непонимание причин выхода частотных преобразователей из строя при коротком замыкании требует дополнительного пристального рассмотрения вопроса.

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.

Представленный 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 не-

прерывно измеряет ток в каждой выходной фазе, и при превышении тока над установленным номинальным значением выполняет действия по защите электропривода. Защитные функции, имеющиеся в преобразователе, эффективно функционируют в различных аварийных ситуациях, в том числе и при коротких замыканиях в цепях нагрузки (в силовом кабеле или в электродвигателе).

Однако, несмотря на имеющуюся защиту от короткого замыкания, выход из строя силовой части преобразователя возможен при некоторых экстремальных условиях. Токи перегрузок при замыканиях могут достигать значений, при которых существует опасность выхода преобразователя частоты из строя. Разрушительные последствия воздействия тока короткого замыкания могут быть различны (рис. 1).

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

Для того, чтобы полупроводник не вышел из строя, внешняя схема управления силовым прибором должна во время обнаружить сверхток и отключить его.

## 2. Различные токовые перегрузочные режимы преобразователей частоты при эксплуатации

Аварийные (перегрузочные) токовые режимы преобразователей 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.

### 2.1. «Медленная» тепловая защита

При небольшом превышении выходного тока\* – не более  $(1,2 \dots 1,5) \times I_n$ , в зависимости от модели преобразователя частоты, – выходное напряжение отключается через некоторое вре-

мя (от 1 мин до 8 мин, в зависимости от уставки пользователя) и на дисплее появляются аварийные сообщения. Например, в общепромышленном преобразователе модели EI-7011\*\* сообщения следующие:

– «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);



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

– «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 является предельной для данного преобразователя частоты.



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

Нарастание тока может происходить медленно (в течение нескольких минут)

\* Здесь, и ниже в п.2.2, речь идет о действующем значении переменного синусоидального тока за период основной частоты (до 50 Гц – для стандартного электродвигателя).

\*\* Примеры в статье приведены на основе преобразователей частоты компании Веспер.

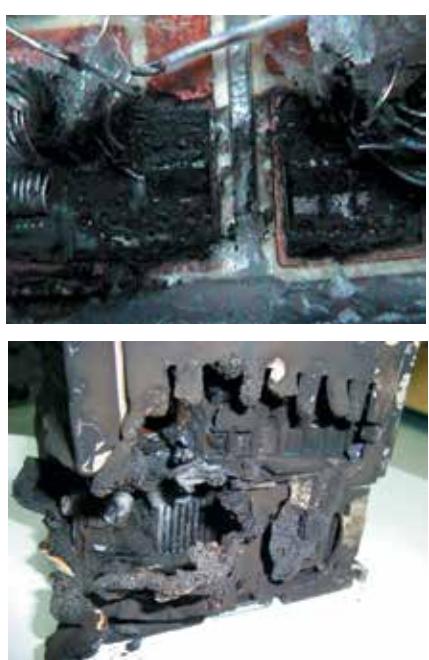


Рис. 1. Повреждение кристаллов IGBT [ 12 ] и внешний вид вышедшего из строя преобразователя частоты.

или быстро (в течение секунд). Протекающий повышенный ток может быть относительно стабильным или изменяющимся (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 путем перегрузки рабочего механизма;
- недостаточной мощности выбранного электродвигателя;
- появления повышенного момента сопротивления в самом электродвигателе (например, в подшипниках) или в сопряженном с ним механизме;
- и др.

## 2.2. «Быстрая» тепловая защита

При достижении выходным током значения  $1,8I_{n}$  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:

«ОС (Over Current) Перегрузка по току» - 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 в результате поломки или разрушения сопряженного с ним механизма;
- попытки плавно разогнать электродвигатель, вращающийся посторонней силой в обратную сторону (например, вентилятор, вращаемый потоком воздуха) - режим противовключения;
- попытки преобразователя пустить застопоренный какой-либо внешней силой электродвигатель;
- и др.

## 2.3. 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 преобразователь 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).



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

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.

## 3. 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.

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

Может возникнуть, например, при нарушении в монтаже, 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 индуктивностью 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-транзистора,

$L = 0,21 \text{ мГн}$  - 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, меньшее одной микросекунды, ток достигает значения, превышающего номинальное в несколько раз. Нахождение IGBT-транзистора при таком токе, вероятнее всего, приведет к его разрушению 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 классифицировать два типа короткого замыкания, различающихся, соответственно, особенностями протекания тока и степенью токовой нагрузки IGBT-транзистора [ 3 ].

**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 растет, транзистор входит в режим самоограничения.

Например, для IGBT-модуля SKM 100GB123D производства Semikron график тока коллектора при замыкании типа 1 выглядит следующим образом [ 3 ] - см. рис. 5.

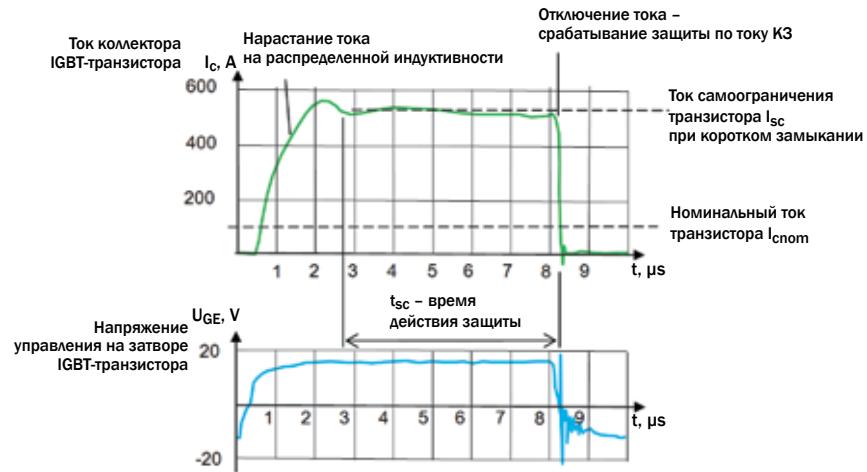


Рис. 5. Ток IGBT-транзистора при коротком замыкании типа 1.

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

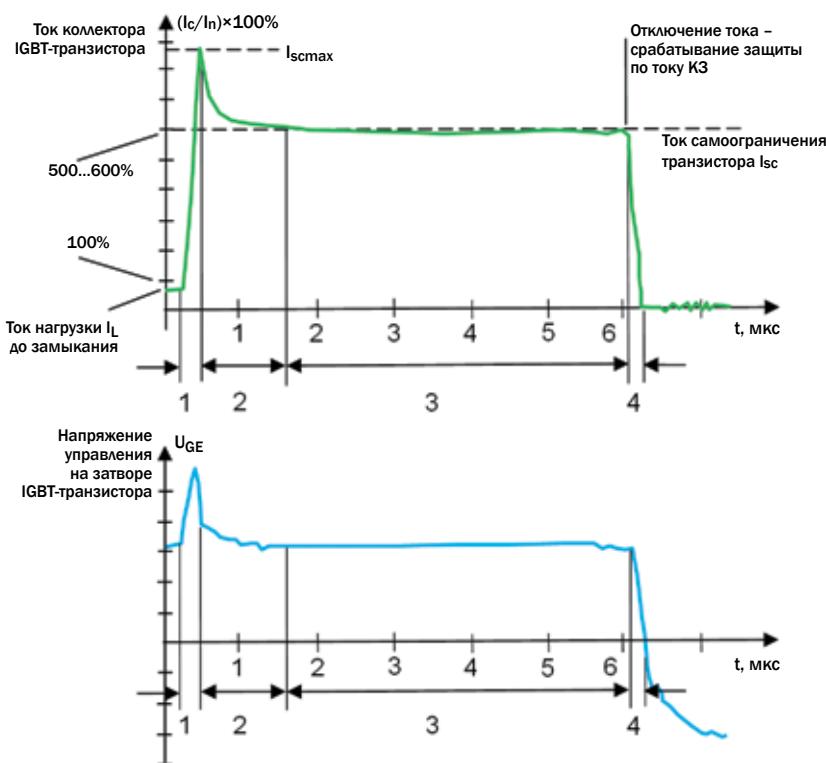


Рис. 6. Ток IGBT-модуля при коротком замыкании типа 2.

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

Через время, не превышающее 10 мкс, в управляющем драйвере срабатывает 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 составляет количество порядка 10 раз [ 8 ].

Следующий случай короткого замыкания нагрузки является наиболее тяжелым режимом для IGBT-транзистора.

**Короткое замыкание на выходе преобразователя происходит после того, как IGBT-транзистор уже включен.**

Другое его название – «жесткий» режим короткого замыкания [ 6 ]. При

этом IGBT-транзистор подвергается большим перегрузкам. Характеристики процесса для пояснения короткого замыкания типа 2 выглядят как показано на рис. 6 [ 3 ].

При «жестком» коротком замыкании

фазы (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).

### 3.2. Случаи короткого замыкания на практике

Короткое замыкание на выходных клеммах преобразователя частоты, или в непосредственной близости от клемм, на практике маловероятно.

Наиболее распространен практический случай короткого замыкания силового кабеля вблизи электродвигателя, в результате механического либо другого повреждения кабеля, или непосредственно в его клеммной коробке, например, в результате нарушения монтажа. Другой распространенный случай: межвитковое замыкание в обмотках электродвигателя.

Физические процессы, происходящие в реальных случаях коротких замыканий, такие же, как и рассмотренные выше (см. выше 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 метров до десятков (или сотен) метров, обладающий распределенной индуктивностью (рис. 7).

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

Для оценки влияния длины 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

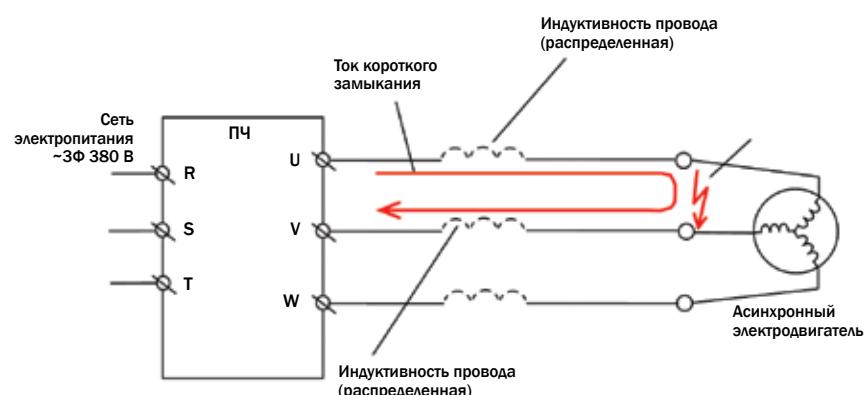


Рис. 7. Эквивалентная схема короткого замыкания.

Длина кабеля от ПЧ до двигателя - 10 м;

Распределенная индуктивность кабеля - 0,26 мГн/м (примерное значение для силового кабеля, диаметр жилы которого составляет  $d = 16 \text{ мм}$  [ 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 время 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, допустимым током короткого замыкания  $6 \times I_{\text{ном}} = 900 \text{ А}$  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 приведенного примера для преобразователя частоты 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 насколько десятков метров, что достаточно распространено на практике, то скорость нарастания тока еще более снижается. Рассмотрим, с учетом этого, следующий пример.

### 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 мГн/м (примерное значение для силового кабеля, диаметр жилы которого составляет  $d = 16 \text{ мм}$  [ 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, т. е. 150 А, то достижение тока значения 150 А + 208 А = 358 А не представляет опасности для транзистора. Защита от короткого замыкания отключит протекающий ток и предотвратит разрушение.

### 4. 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



Рис. 8. Выходной фильтр  $du/dt$ .

– снижает амплитуду выбросов напряжения на электродвигателе, которые могут привести к пробою изоляции обмоток;

и, в части токовой защиты –

– выходной фильтр  $du/dt$  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

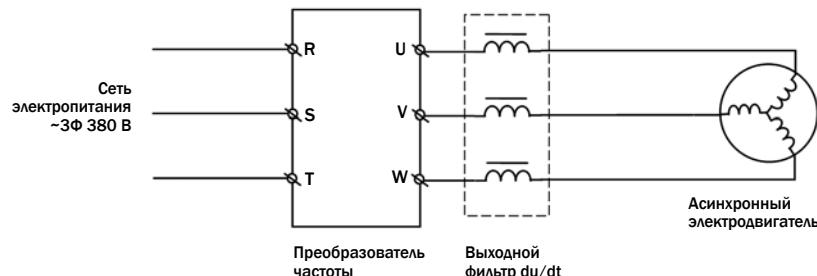


Рис. 9. Подключение выходного фильтра  $du/dt$ .

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;

действительности значительно (в десятки раз) меньше максимальной величины тока без фильтра.

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).

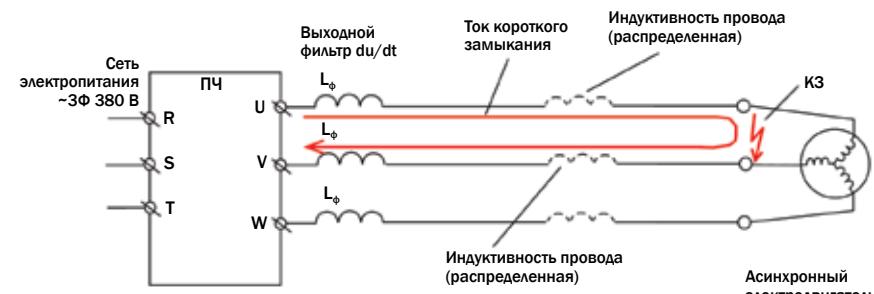


Рис. 10. Эквивалентная схема короткого замыкания при наличии выходного фильтра  $du/dt$ .

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

**Пример 4.** Мощность преобразователя частоты - 37 кВт;

Длина кабеля от ПЧ до двигателя - 10 м;

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 ко-

никах в частотной области. – «Силовая электроника», № 1, 2006 г.

3. Принципы работы мощных MOSFET и IGBT транзисторов. Статья с сайта [http://www.gaw.ru/html.cgi/txtr/doc/transistor/igbt\\_semi/4\\_6\\_2.htm](http://www.gaw.ru/html.cgi/txtr/doc/transistor/igbt_semi/4_6_2.htm)

4. А. Колпаков. Особенности применения драйверов MOSFET и IGBT. – «Компоненты и технологии», № 6, 2000 год.

5. BSM300GB120DLC Datasheet - характеристики IGBT-модуля с сайта <http://www.datasheetarchive.com/BSM300GB120DLC-datasheet.html>

6. Дж.Крапп. Защитные функции современных драйверов IGBT. Перевод А.Колпаков. – «Силовая электроника», № 5, 2010 год.

7. П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Справочная книга. – Л., Энергоатомиздат, 1986.

8. Б. Гутсманн, П. Каншат, М. Мюнцер, М. Пфаффенленер, Т. Ласка. Перевод А. Колпаков. Режим повторяющегося короткого замыкания в Trench IGBT-структуратах. – «Компоненты и технологии», № 8, 2010 г.

9. А. Колпаков, Л. Йохим. Проблемы проектирования IGBT-инверторов: перенапряжения и снабжения. – «Компоненты и технологии», № 5, 2008 г.

10. Моторные дроссели - функции и параметры на сайте <http://tehprivod.ru/katalog/preobrazovateli-chastoty/aksesuary-dlya-pch/motornye-drosseli.html>

11. SKM150GB123D - характеристики IGBT-модуля с сайта [http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKM150GB123D\\_22890260.pdf](http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKM150GB123D_22890260.pdf)

## Короткое замыкание чаще происходит вблизи двигателя в результате повреждения кабеля или в клеммной коробке из-за нарушения монтажа

Распределенная индуктивность кабеля - 0,26 мГн/м;

Выходной фильтр  $\frac{du}{dt}$  - 37 кВт, 0,12 мГн;

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

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

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.

### 5. Выводы

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

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, т. к. при коротком замыкании ток мгновенно возрастает за время от долей микросекунд до десятков микросекунд 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

коротких замыканий выходных цепей:

1) При достаточно длинных силовых кабелях эквивалентной индуктивности в петле короткого замыкания достаточно для того, чтобы 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 повышения эффективности токовой защиты пре-

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

образователя от короткого замыкания является установка выходного фильтра  $\frac{du}{dt}$  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. Статья с сайта <http://energomodul.ru/rekomendacii>
2. В. Худяков. Школа MATLAB. Урок 5. Анализ свойств силовой электро-

12. А. Бормотов, В.Мартыненко, В.Мускатиньев. Некоторые вопросы эксплуатации IGBT силовых модулей. – «Компоненты и технологии», № 5, 2005 г.

**Компания  
ВЕСПЕР**

Барутсков И. Б.,  
Цыганков Е. В.

### ■ 000 «ВЕСПЕР АВТОМАТИКА»

- ✉ 125438, г. Москва, ул. Михалковская, д. 63, Б, стр. 4.
- ☎ Многоканальный тел./факс: (495) 258-00-49
- ✉ E-mail: mail@vesper.ru

На правах рекламы