

Влияние КЗ на работу IGBT

в системе электропривода

Устойчивость электропривода к наступлению короткого замыкания (КЗ) является одним из ключевых факторов обеспечения его надежности и защищенности. Данная статья рассматривает влияние суммарной индуктивности проводников на величину тока насыщения при КЗ. Кроме того, кратко обсуждаются методы борьбы с выбросами напряжения, в том числе с помощью плавного выключения IGBT.

Вячеслав Гавриков

Кирилл Автушенко

Достижение высокой надежности — перво-степенная задача для промышленных систем. Одно из обязательных требований, предъявляемых к электроприводу, — обеспечение устойчивости к КЗ. Существует множество видов короткого замыкания: межфазное, на силовую шину, замыкание между шинами питания. Каждый из перечисленных типов аварий имеет свои особенности, которые

необходимо учитывать для построения эффективной системы защиты.

Важным параметром короткого замыкания является индуктивность. Она определяет значение тока насыщения IGBT и рассеиваемую мощность при КЗ. Величина индуктивности зависит от количества проводников, их длины, сечения и места возникновения КЗ — на выводах двигателя, в обмотках или на клеммах электропривода.

Если индуктивность мала, то скорость нарастания тока di/dt высока. В этом случае IGBT выходит из насыщения быстро, и происходит ускоренный разогрев кристалла. При большей индуктивности скорость нарастания тока di/dt меньше и выход IGBT из фазы насыщения затягивается. При этом напряжение на IGBT, рассеиваемая мощность и перегрев кристалла достаточно малы. В таком состоянии транзистор сохраняет работоспособность значительно дольше.

Однако следует помнить, что большая индуктивность приводит к большим скачкам напряжения при выключении. Необходимо защищаться от таких бросков, чтобы предотвратить пробой IGBT. Если КЗ случилось во включенном состоянии IGBT, то при ускоренном выходе из насыщения возникает скачок напряжения dv/dt . Это приведет к скачку напряжения на затворе и, как следствие, вызовет рост тока КЗ и увеличение рассеиваемой мощности. При значительном перегреве кристалл IGBT может быть поврежден.

Использование снабберных RC- или RCD-цепей помогает защититься от перенапряжений в момент выключения. Впрочем, данный способ имеет недостатки, которые заключаются в повышении стоимости, размера и мощности потерь схемы в целом. Наиболее эффективным методом защиты IGBT от КЗ является метод плавного выключения. Он позволяет устранить выбросы напряжения и улучшает надежность системы. Плавное выключение активируется только при возникновении КЗ и, соответственно, не влияет на общую эффективность схемы в нормальных условиях работы.

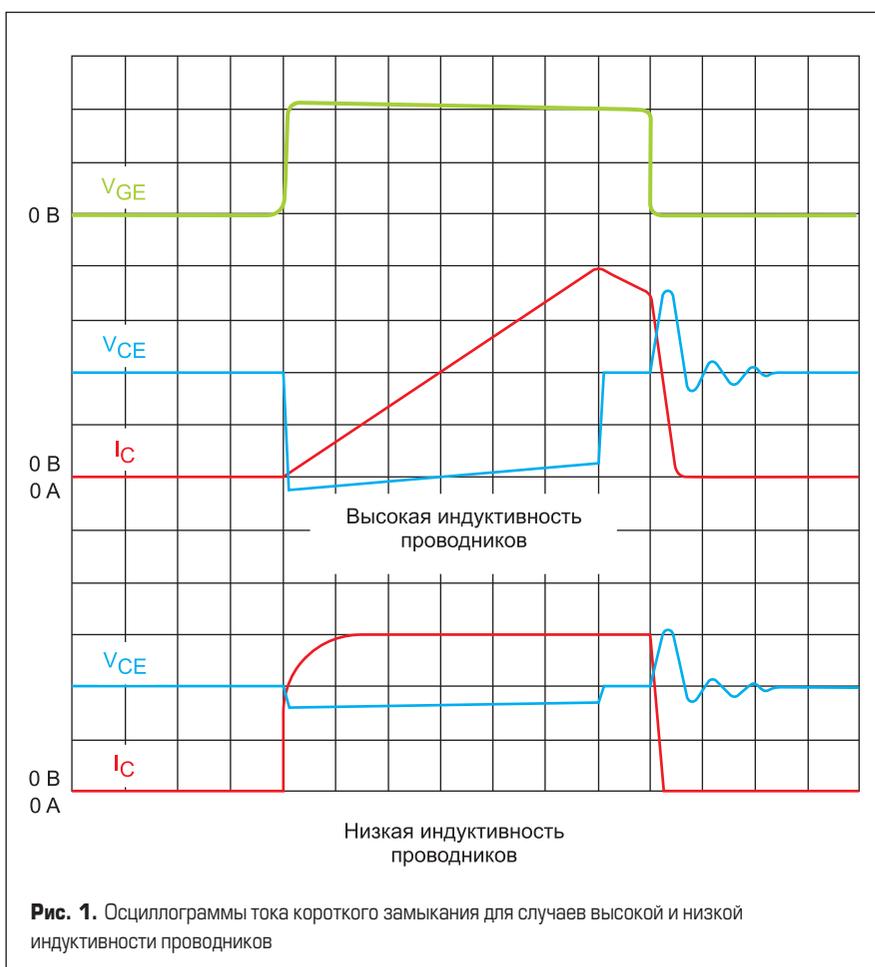


Рис. 1. Осциллограммы тока короткого замыкания для случаев высокой и низкой индуктивности проводников

Экспериментальные результаты исследования для различных условий КЗ

Экспериментальные данные показывают, что при возникновении КЗ величина индуктивности значительно влияет не только на форму и время выхода из насыщения, но и на амплитуду тока (рис. 1) [1].

Для того чтобы объяснить изменение амплитуды, надо вспомнить, что для IGBT максимальное значение тока зависит от величины проводимости (G_{FE}). Проводимость имеет отрицательный температурный коэффициент. То есть при уменьшении температуры G_{FE} возрастает и, соответственно, увеличивается ток короткого замыкания. И наоборот, рост температуры приводит к уменьшению G_{FE} и снижению тока КЗ.

Учитывая вышесказанное, увеличение амплитуды тока с ростом индуктивности можно объяснить следующим образом. Если КЗ возникает не на клеммах привода, а на концах соединительных кабелей, то большая индуктивность кабеля уменьшает скорость нарастания тока di/dt и напряжение V_{CE} (коллектор-эмиттер) до тех пор, пока транзистор не выйдет из области насыщения (рис. 1, осциллограмма 2). В течение этого времени рассеиваемая мощность IGBT и перегрев его кристалла малы. Низкая температура кристалла приводит к росту проводимости G_{FE} и величины тока КЗ.

Такой же эффект вызывает и наличие большой индуктивности выводов привода, печатных проводников и других индуктивностей системы.

Если КЗ произошло непосредственно на выводах привода и суммарная индуктивность мала, то это вызывает высокую скорость нарастания di/dt тока и IGBT выходит из области насыщения быстро (рис. 1, осциллограмма 3). В результате высокой скорости нарастания тока и большого значения V_{CE} в течение КЗ происходит увеличение рассеиваемой мощности и рост температуры кристалла. Перегрев уменьшает проводимость и величину тока КЗ.

В итоге при большем значении индуктивности ток КЗ больше, а мощность, рассеиваемая IGBT, меньше.

Для защиты от перегрева и выхода из строя IGBT его необходимо отсоединить. При резком выключении происходит выброс напряжения, приложенного к транзистору. Чем выше скорость выключения, тем выше скорость изменения тока di/dt и тем больше перенапряжение.

Для ускорения выключения часто используют дополнительное запирающее отрицательное напряжение V_{GE} (затвор-эмиттер) (рис. 2). Рост амплитуды обратного импульса V_{GE} вызывает увеличение di/dt , а также значения амплитуды выброса напряжения.

Очевидно, что максимальные перенапряжения происходят при резком выключении IGBT в условиях КЗ. В этом случае может произойти электрический пробой транзистора. Электропривод в обязательном поряд-

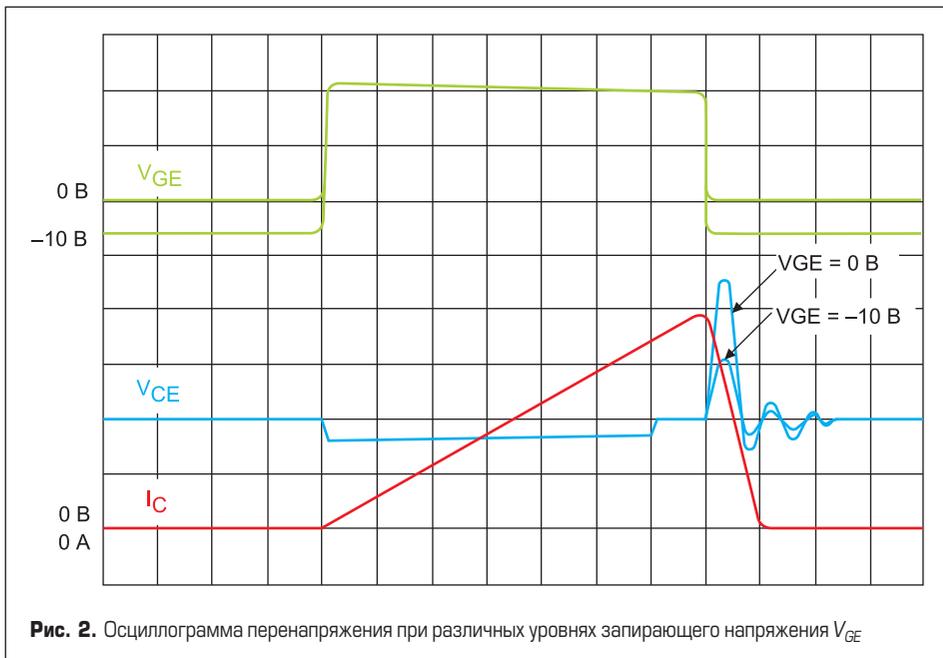


Рис. 2. Осциллограмма перенапряжения при различных уровнях запирающего напряжения V_{GE}

ке должен быть устойчив к таким авариям. Существует два основных метода защиты IGBT от КЗ.

Методы повышения надежности инвертора в условиях КЗ

Снабберные RC- или RCD-цепочки

Такие цепи ограничивают выбросы напряжения при резком выключении, тем самым защищая IGBT от пробоя (рис. 3). Принцип работы снабберной цепи заключается в уменьшении значения di/dt . Наличие

дополнительных компонентов увеличивает не только стоимость устройства и занимаемую площадь, но и суммарную мощность потерь. Действительно, снабберная цепь присутствует всегда, вне зависимости от наличия КЗ. Она имеет свои токи заряда/разряда и утечки. В устройствах, критичных к цене, габаритам и эффективности, подобное решение применяется редко.

Метод плавного выключения

Суть метода состоит в плавном выключении транзистора, что уменьшает выбросы

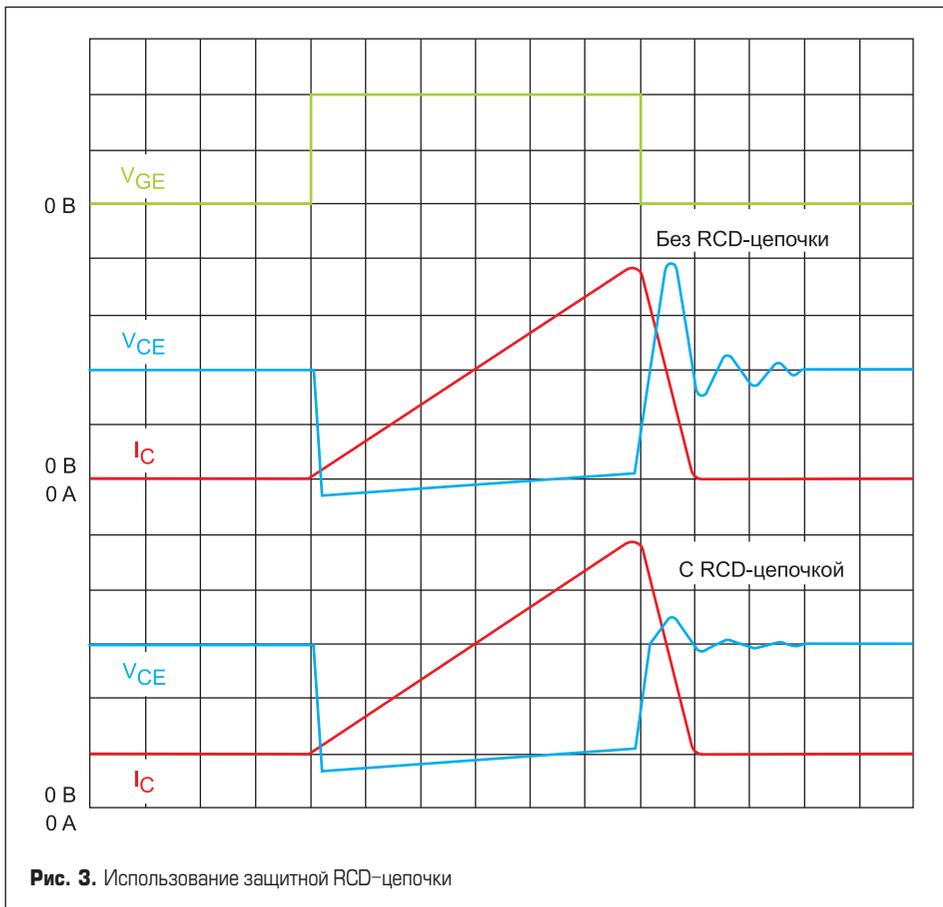


Рис. 3. Использование защитной RCD-цепочки

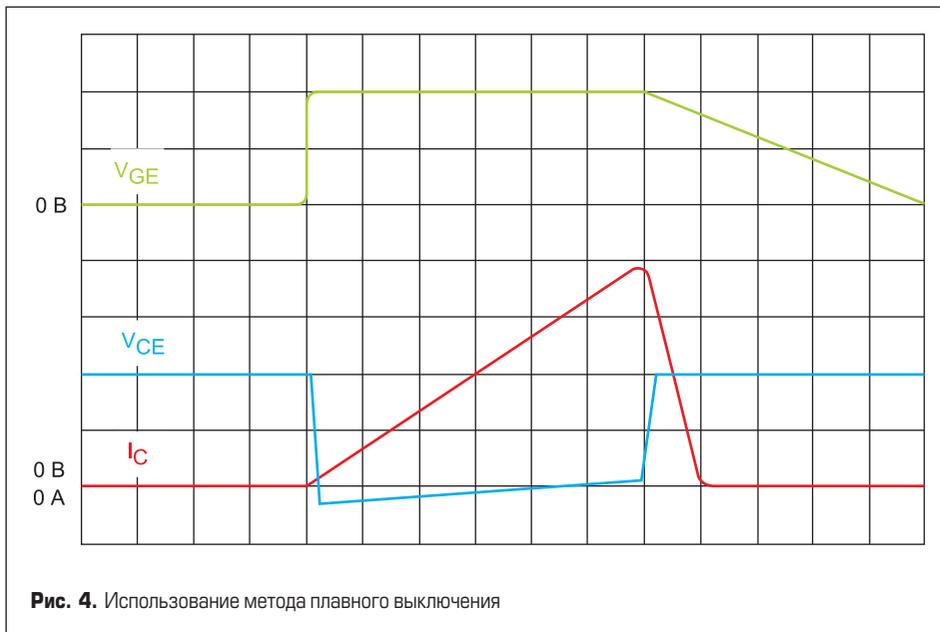


Рис. 4. Использование метода плавного выключения

напряжения и увеличивает защищенность системы (рис. 4). Плавное выключение используется только при возникновении короткого замыкания и не влияет на работу привода в нормальных условиях. Кроме того, этот метод может быть применен без значительного возрастания стоимости и габаритов устройства.

Особенности выбора IGBT для систем электропривода

Оптимальный выбор IGBT — сложная задача, особенно если учесть, что каждый производитель приводит огромное количество параметров. В общем случае конкретный IGBT выбирают по максимальному значению рабочего тока и мощности потерь.

Для электроприводов дополнительная сложность заключается в необходимости использования IGBT, устойчивых к кратковременным КЗ (TSC IGBT или IGBT с характеристикой SCSSOA, Short Circuit Safe Operating Area — область безопасной работы в режиме КЗ). При возникновении КЗ через транзистор начинает протекать ток, ограниченный лишь коэффициентом усиления IGBT. Схема защиты в этом случае должна за отведенное время (единицы микросекунд) успеть обнаружить КЗ и отключить транзистор.

Основным параметром, характеризующим устойчивость TSC IGBT к короткому замыканию, является минимальное допустимое время короткого замыкания t_{SC} (Short Circuit Withstand Time), характеризующее длительность КЗ, которое транзистор может выдержать без потери работоспособности, пока не активируется схема защиты. Таким образом, кроме величины тока и потерь мощности, требуется учитывать и значение t_{SC} . При этом необходимо искать компромисс между тремя указанными параметрами.

Значения допустимых токов и токов КЗ влияют на величину t_{SC} [3]. Действительно, увеличение коэффициента усиления по току приводит к росту тока КЗ, а это требует умень-

шения t_{SC} . Величина t_{SC} влияет и на значение потерь мощности IGBT. Как известно, потери мощности IGBT складываются из активных потерь проводимости и потерь на переключение. На величину активных потерь основное влияние оказывает значение напряжения насыщения $V_{CE(ON)}$. Величина потерь на переключение в большей степени определяется энергией коммутации (Total Switching Loss или E_{ts}).

Уменьшение t_{SC} позволяет повысить коэффициент усиления, что неизбежно приводит к снижению $V_{CE(ON)}$, а значит, и к уменьшению мощности потерь проводимости (рис. 5) [3].

В то же время уменьшение $V_{CE(ON)}$ в обязательном порядке приводит к увеличению E_{ts} , и наоборот (рис. 6). Исследования показывают, что уменьшение t_{SC} улучшает соотношение $V_{CE(ON)}$ и энергии потерь на выключение [3]. Таким образом, при уменьшении t_{SC} потери на переключение уменьшаются.

В подтверждение вышесказанного можно привести сравнение трех IGBT производства

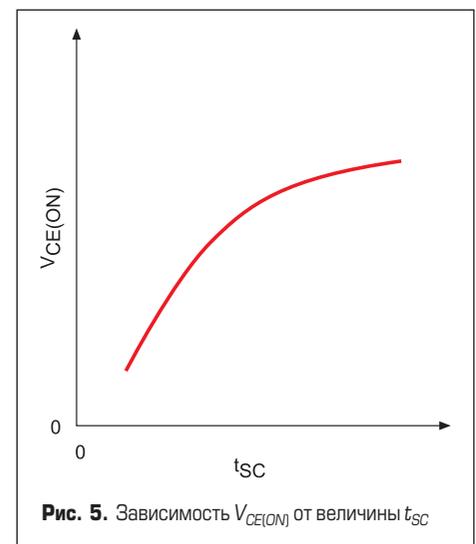


Рис. 5. Зависимость $V_{CE(ON)}$ от величины t_{SC}

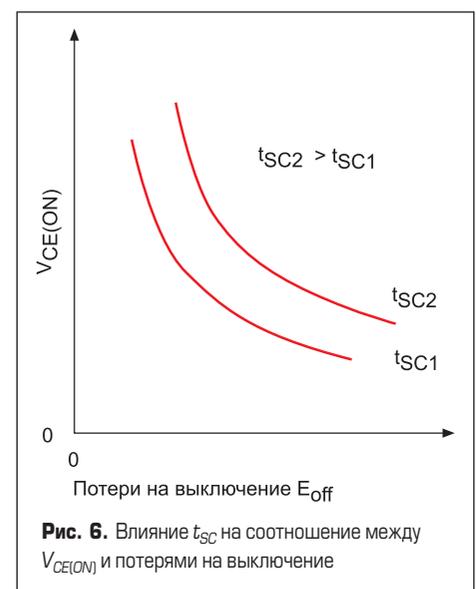


Рис. 6. Влияние t_{SC} на соотношение между $V_{CE(ON)}$ и потерями на выключение

International Rectifier: IRG4PC60UPBF (нет t_{SC}); IRGP4063PBF ($t_{SC} = 5$ мкс); IRG4PSC71KPBF ($t_{SC} = 10$ мкс) (рис. 7). Все транзисторы предназначены для работы с напряжениями до 600 В. Как видно из представленной за-

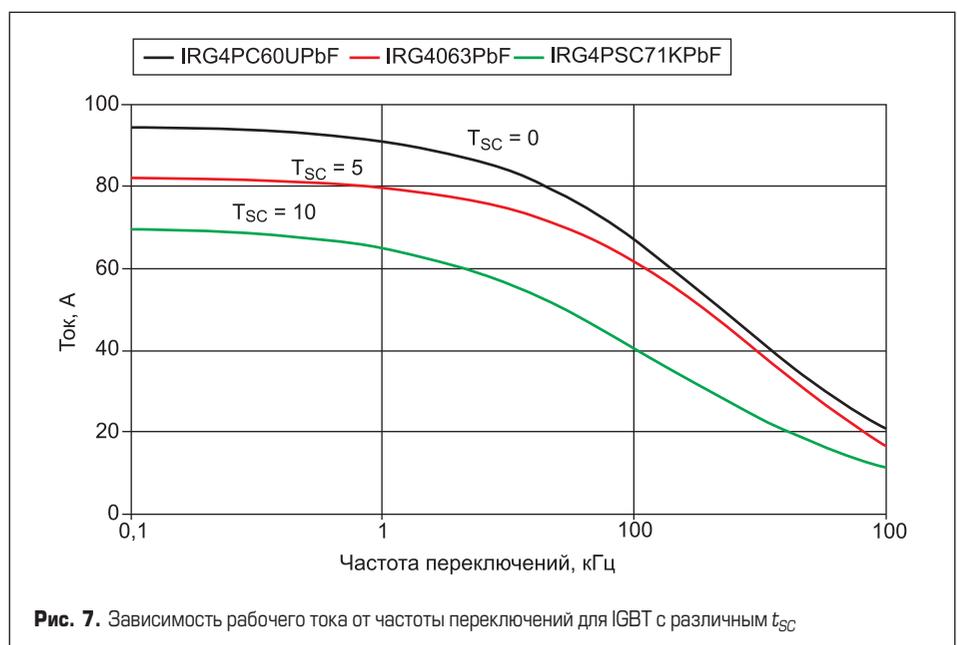


Рис. 7. Зависимость рабочего тока от частоты переключений для IGBT с различным t_{SC}

висимости тока от частоты, наиболее устойчивый к КЗ IRG4PSC71KPBF имеет меньшее значение тока. IRG4PC60UPBF не имеет защиты от КЗ ($t_{SC} = 0$), но обладает большим значением тока.

Уменьшение допустимого времени КЗ ограничено временем срабатывания схем защиты. Однако важно отметить, что схемы

защиты постоянно совершенствуются. Время срабатывания у них уменьшается, а это позволяет использовать IGBT с меньшими значениями t_{SC} , что обеспечивает сокращение тепловых потерь в транзисторах и повышает общий КПД инверторной системы.

Компания International Rectifier выпускает несколько серий IGBT-транзисторов, предна-

значенных для применения в системах электропривода и обладающих различным временем безопасной работы в режиме КЗ. Эти транзисторы снабжены встроенным антипараллельным диодом (Co-Pack-исполнение) и рассчитаны на питание системы от однофазной (номинальное напряжение IGBT 600 В) и трехфазной (номинальное напряжение IGBT 1200 В) сетей

Таблица 1. IGBT от International Rectifier со встроенным диодом и $t_{SC} = 5-6$ мкс

Наименование	Максимальное напряжение V_{ce} , В	Корпус	Рабочий ток I_c , А		Напряжение насыщения $V_{ce(on)}$, В		Рабочая частота, кГц	Технология производства*	Энергия переключения E_{tr} , мДж		Падение на диоде $V_{f, тип.}$, В		
			25 °С	100 °С	тип.	макс.			тип.	макс.			
IRGB4059D	600	TO-220	8	4	1,75	2,05	8-30	FS Trench	0,11	0,20	1,60		
IRGB4607D			11	7	1,75	2,05			0,22	-	1,70		
IRGB4045D			12	6	1,70	2,00			0,18	0,23	1,60		
IRGB4060D			16	8	1,55	1,85			0,22	0,31	1,80		
IRGB4610D			16	10	1,70	2,00			0,18	-	1,60		
IRGB4064D			20	10	1,60	1,91			0,23	0,34	2,50		
IRGB4615D			23	15	1,55	1,85			0,22	-	1,80		
IRGB4056D			24	12	1,55	1,85			0,30	0,39	2,10		
IRGB4620D			32	20	1,55	1,85			0,30	-	2,10		
IRGB4061D			36	18	1,65	1,95			0,45	0,55	2,30		
IRGB4630D			47	30	1,65	1,95			0,45	-	2,10		
IRGB4062D			48	24	1,60	1,95			0,72	0,90	1,80		
IRGB4640D			65	40	1,60	1,95			0,72	0,90	1,80		
IRGP4620D			32	20	1,55	1,85			0,30	-	2,10		
IRGP4630D			47	30	1,65	1,95			0,45	-	2,10		
IRGP4062D			48	24	1,60	1,95			0,72	0,90	1,80		
IRGP4640D			65	40	1,60	1,95			0,72	0,90	1,80		
IRGP4078D			76	50	1,60	1,85			1,02	1,26	2,20		
IRGP4069D			76	50	1,60	1,85			1,02	2,20	2,20		
IRGP4650D			76	50	1,60	1,85			1,02	2,20	2,20		
IRGP4063			96	48	1,65	2,14			1,90	2,62	-		
IRGP4063D			96	48	1,65	2,14			1,90	2,62	1,95		
IRGP4068D			96	48	1,65	2,14			-	-	0,96		
IRGP4063D1			96	48	1,65	2,14			1,90	2,62	2,00		
IRGP4660D			96	60	1,65	2,14			1,90	2,62	1,95		
IRGP4690D			140	90	1,70	2,10			1,90	2,62	1,95		
IRGP4066D			140	90	1,70	2,10			4,62	6,40	2,23		
IRGPS46160D			240	160	1,70	2,05			1,90	2,62	1,95		
IRGPS4067D			240	160	1,70	2,05			9,18	12,35	2,40		
IRGB4715D			650	TO-220	23	15			1,55	1,85	0,22	-	1,80
IRGP4262D				TO-247**	65	40			1,60	1,95	0,72	0,90	1,80
IRGP4269D					76	50			1,70	2,10	4,62	6,40	2,23
IRGP4263D	96	60			1,65	2,14	1,90	2,62	1,95				
IRGP4266D	140	90			1,70	2,10	4,62	6,40	2,23				
IRGP4266D	140	90			1,70	2,10	4,62	6,40	2,23				
IRGPS46160D	TO-274AA	240	160	1,70	2,05	9,18	12,35	2,40					

Примечания. * — FS Trench=Field-Stop Trench; ** — доступны в корпусах TO-247AC и TO-247AD (удлиненные выводы).

Таблица 2. IGBT от International Rectifier со встроенным диодом и $t_{SC} = 10$ мкс

Наименование	Максимальное напряжение V_{ce} , В	Корпус	Рабочий ток I_c , А		Напряжение насыщения $V_{ce(on)}$, В		Рабочая частота, кГц	Технология производства*	Энергия переключения E_{tr} , мДж		Падение на диоде $V_{f, тип.}$, В
			25 °С	100 °С	тип.	макс.			тип.	макс.	
IRG4BC10KD	600	TO-220	9	5	2,39	2,62	8-30	PT	0,39	0,48	1,50
IRG4BC15MD			14	9	1,88	2,30	1-8	PT	2,25	3,60	1,50
IRGB4B60KD1			14	9	2,10	2,50	8-30	NPT	0,12	0,13	1,40
IRG4BC20KD			16	9	2,27	2,80		PT	0,64	0,96	1,40
IRGB6B60KD			18	10	1,80	2,20	NPT	0,25	0,46	1,25	
IRG4BC20MD			18	11	1,85	2,10	1-8	PT	2,44	3,70	1,40
IRG4BC30KD			28	16	2,21	2,70	PT	1,18	1,60	1,40	
IRGB15B60KD			31	15	1,80	2,20	NPT	0,56	0,79	1,20	
IRGB10B60KD			35	19	1,80	2,20	NPT	0,39	0,67	1,30	
IRG4PC30KD			28	16	2,21	2,70	PT	1,18	1,60	1,40	
IRG4PC40KD			42	25	2,10	2,60	PT	1,71	2,30	1,30	
IRGP30B60KD-E			60	30	1,95	2,35	NPT	1,18	1,58	1,30	
IRG4PC50KD			52	30	1,84	2,20	PT	2,45	3,00	1,30	
IRG4PSC71KD			85	60	1,83	2,30	PT	6,28	7,70	1,40	
IRGB5B120KD			12	6	2,75	3,00	NPT	0,72	0,88	2,13	
IRG4PH20KD			11	5	3,17	4,30	PT	0,92	1,20	2,50	
IRG4PH30KD			20	10	3,10	4,20	PT	2,10	2,60	3,40	
IRG4PH40KD			30	15	2,74	3,40	PT	2,43	2,80	2,60	
IRG4PH50KD			45	24	2,77	3,50	PT	5,73	7,90	2,50	
IRGP20B120UD-E			40	20	3,05	3,45	NPT	1,28	1,80	1,67	
IRG7PH37K10D	40	25	1,90	2,20	FS Trench	1,60	2,70	2,50			
IRGP30B120KD	60	30	2,46	2,66	NPT	2,56	3,05	1,86			
IRG7PH44K10D	70	40	1,90	2,20	FS Trench	3,40	5,20	2,50			
IRG7PH50K10D	85	50	1,90	2,20	FS Trench	4,20	6,00	2,50			
IRG4PSH71KD	78	42	2,97	3,90	PT	8,90	11,60	2,50			
IRGPS40B120UD	80	40	3,12	3,40	NPT	3,05	3,80	2,03			
IRG7PSH54K10D	100	75	1,90	2,20	FS Trench	7,50	9,40	2,50			
IRGPS60B120KD	105	60	2,50	2,75	NPT	8,00	10,32	1,93			

Примечания. * — PT=Punch Through, NPT=Non-Punch Through, FS Trench=Field-Stop Trench; ** — доступны в корпусах TO-247AC и TO-247AD (удлиненные выводы).

переменного тока. Инверторные системы на их основе могут обеспечить выходные мощности в диапазоне от сотен ватт до десятков киловатт. Наиболее интересные представители таких серий в выводных корпусах и их основные характеристики приведены в таблицах 1 и 2.

Заключение

Величина и форма тока короткого замыкания зависят от условий возникновения КЗ. Осмысление всех влияющих факторов (места возникновения КЗ, числа и длины проводников, типа выводов) важно для построения адекватной защиты от КЗ. Наиболее современным и эффективным методом защиты

IGBT-систем от короткого замыкания является метод плавного выключения IGBT.

Выбор IGBT должен производиться с учетом максимального рабочего тока и эффективности преобразования энергии. Однако при проектировании систем инверторных электроприводов необходимо дополнительно обеспечить защиту транзистора от КЗ. Для этой задачи оптимальным решением становится использование IGBT с функцией SCSOA. Многие семейства IGBT от компании International Rectifier обладают зоной безопасной работы в режиме КЗ шириной 5 и 10 мкс и позволяют проектировать инверторные системы промышленного электропривода мощностью до нескольких десятков киловатт.

Литература

1. Bolloju V., Yang J. Influence of Short Circuit conditions on IGBT Short circuit current in motor drives. — International Rectifier. www.irf.com/technical-info/whitepaper/apec11igbt.pdf
2. Bolloju V., Yang J., Kabaker E. Choosing the right IGBT Trade-Offs to maximize Motor Drive performance. — International Rectifier, 2009. www.irf.com/technical-info/whitepaper/apec11igbt.pdf
3. Chokhawala R. Trade-off consideration between efficiency and short circuit capability in IGBTs. — International Rectifier. www.irf.com/technical-info/whitepaper/apec11igbt.pdf