

Новая серия мощных биполярных модулей

с повышенным быстродействием для частотно-регулируемого электропривода

В статье представлены результаты разработки ОАО «Электровыпрямитель» мощных диодно-тиристорных модулей с повышенным быстродействием для энергоэффективных применений в частотно-регулируемом электроприводе.

**Валентин Мартыненко
Алексей Гришанин
Лариса Лебедева
Сания МаксUTOва
Леонид Вовк
Галина Варянова**

martin@moris.ru

С учетом того, что около 65% производимой электроэнергии в различных отраслях промышленности расходуется на работу электродвигателей, нет ничего удивительного в том, что частотно-регулируемый электропривод рассматривается как одно из приоритетных направлений на пути к повышению энергоэффективности и производительности, рентабельности и конкурентоспособности производимого продукта. Частотно-регулируемый электропривод приводит в движение бесчисленное множество рабочих машин и механизмов, используемых практически во всех сферах человеческой деятельности. Большая часть электроэнергии потребляется электроприводами на основе повсеместно используемых асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, для которых основным направлением энергосбережения является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому. Широкое внедрение мощных частотно-регулируемых электроприводов в свою очередь неразрывно связано с развитием преобразовательной техники, качество схемных решений которой зависит от используемых силовых полупроводниковых приборов.

В частотно-регулируемых асинхронных электроприводах распространение получили две группы схем преобразователей частоты: автономные инверторы напряжения (АИН) и автономные инверторы тока (АИТ). Данная классификация схем определяется характером обмена электроэнергией между источником питания и потребителем. Наиболее эффективно использование высоковольтных частотно-регулируемых преобразователей по схеме АИТ с отсекающими диодами, например в электроприводе центробежных насосов магистральных нефте- и газопроводов [1].

Биполярные приборы с повышенным быстродействием для АИТ

АИТ представляет собой преобразователь энергии постоянного тока в энергию переменного тока. Источник питания на его входе обладает большим

внутренним индуктивным сопротивлением, обеспечивающим постоянство потребляемого тока. Обычный асинхронный двигатель рассчитан на питание синусоидальным напряжением, и именно такое напряжение получает он при питании от инвертора тока. Токовая идеология схем АИТ в сочетании со специальными алгоритмами управления позволяет обеспечить практически синусоидальное выходное напряжение преобразователей, то есть высокий уровень электромагнитной совместимости с двигателем. При этом для комплектации схем АИТ, в отличие от АИН, принципиальным является не наличие прибора с полной управляемостью, а наличие прибора с хорошими динамическими характеристиками. Поскольку к мощным преобразователям предъявляются повышенные требования по минимизации потерь в полупроводниковых приборах, однооперационные тиристоры и диоды, имеющие значительно меньшие падения напряжения в открытом состоянии (по сравнению с полностью управляемыми приборами), по-прежнему остаются в центре внимания разработчиков [2]. Таким образом, классическую схему автономного инвертора тока экономически целесообразно строить на однооперационных биполярных приборах вместо более дорогих полностью управляемых.

Принципиально важно, чтобы биполярные приборы, используемые в преобразователях частоты по схеме АИТ, были достаточно высоковольтными, обладали малыми падениями напряжения в открытом состоянии и имели малые заряды обратного восстановления. Данные требования соответствуют основным тенденциям развития всех силовых полупроводниковых приборов:

- увеличение коммутируемой мощности при сохранении высокого быстродействия;
- увеличение степени интеграции и эффективности систем охлаждения.

При проектировании тиристоров и диодов существует ряд ограничений, которые делают невозможным сочетание в одном классе приборов максимальных значений основных характеристик — блокирующего напряжения, импульсного напряжения



Рис. 1. Серия беспотенциальных мощных биполярных модулей

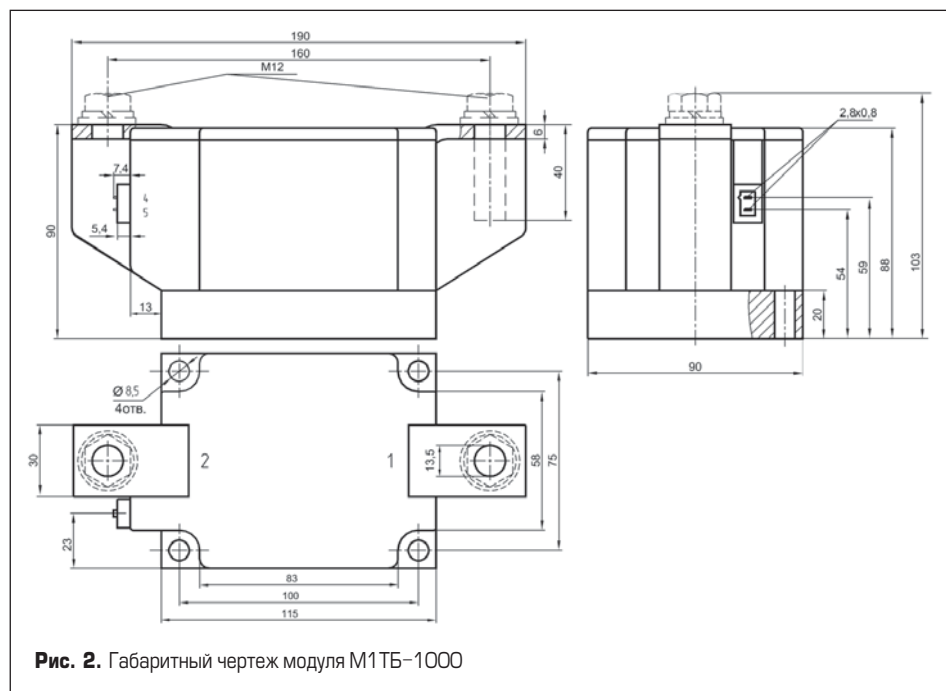


Рис. 2. Габаритный чертеж модуля М1ТБ-1000

в открытом состоянии, заряда обратного восстановления и времени выключения. Ограничения носят принципиальный характер и связаны с физическими принципами работы приборов на основе многослойных структур с *p-n*-переходами, другие связаны с техническим уровнем производства. Так, например, при снижении величины заряда обратного восстановления тиристоры и диоды происходит рост величины импульсного напряжения в открытом состоянии для тиристоры и прямого напряжения для диодов. Поскольку для частотно-регулируемого электропривода на базе АИТ необходимы биполярные приборы с малыми значениями падений напряжения и зарядом обратного восстановления, это обуславливает необходимость разработки приборов специальной конструкции с оптимальными параметрами структур и технологического процесса их изготовления.

Современный рынок преобразователей требует постоянного снижения габаритных размеров преобразователей и их стоимости. Для успешного решения этих задач необходимо повышать эффективность работы силовых ключей, в том числе за счет увеличения значения коммутируемых токов. Для сокращения количества используемых ключей и, соответственно, параллельных ветвей преобразователя необходимо увеличивать нагрузочную способность силовых приборов по току. С другой стороны, эффективность схем преобразователей частоты можно повысить путем перехода на модульное исполнение биполярных приборов вместо таблеточного. Конструкция беспотенциальных модулей имеет определенные преимущества перед дискретными тиристорами и диодами: она позволяет устанавливать все приборы на один охладитель, что существенно упрощает процессы принудительного охлаждения и монтажа.

Конструкция и параметры модулей

Появлению модульных вариантов однооперационных тиристоры и диоды способство-

вала потребность рынка. С конца 1990-х гг. на ОАО «Электровыпрямитель» была разработана серия тиристоры и диоды с повышенным быстродействием в модульном исполнении, специально ориентированных для преобразователей частоты, построенных по схеме АИТ. С увеличением требований преобразовательной техники к коммутируемой мощности единичного ключа развивался и конструктивный ряд биполярных модулей. Закономерным продолжением работ в данном направлении явилась разработка серии мощных тиристорно-диодных модулей с повышенным быстродействием М1ТБ-1000 и М1ДЧ-1000 с шириной основания 90 мм (рис. 1).

Силовые модули представляют собой конструкцию в прочных пластмассовых корпусах размером 115×90×90 мм с полупроводниковым элементом диаметром 76 мм. Модули изготавливаются по технологии прижимного контакта, что обеспечивает им высокую стойкость к термоциклированию, надежную работу в режиме больших токовых нагрузок, эксплуатацию в тяжелых климатических условиях. Модули устойчивы к механическим воздействиям и влиянию неблагоприятных факторов окружающей среды, так как залиты специальным компаундом, который осуществляет защиту полупроводникового элемента от воздействия влаги. Корпус модуля закреплен на медное основание, служащее для отвода тепла и крепления прибора в преобразователе. Конструкция внутрикорпусных

соединений обеспечивает тепловую и механическую прочность, а также долговечность в условиях переменных нагрузок.

Основание приборов изолировано от силового и управляющего выводов с помощью теплопроводящей керамики из нитрида алюминия. Электрическая прочность изоляции между токоведущими шинами и теплопроводящим основанием — более 3000 В.

Габаритные размеры тиристорного модуля приведены на рис. 2. Масса одного модуля составляет 4,3 кг. Корпус диодного модуля отличается от тиристорного отсутствием управляющей колодки. Следует заметить, что данного конструктивного исполнения нет ни у одной фирмы мира, занимающейся производством полупроводниковых приборов силовой электроники. Конструкция модуля защищена патентом Российской Федерации.

Основные параметры модулей М1ТБ-1000 и М1ДЧ-1000 приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

При разработке данной серии модулей были определены оптимальные геометрические и электрофизические параметры кремниевых структур тиристоры и диоды, рассчитанных на рабочие напряжения 2400 и 2600 В соответственно. В открытом состоянии падение напряжения на полупроводниковом приборе должно быть минимально возможным, а при блокировании высокого напряжения не должно быть значительных потерь, вызванных накопленным зарядом неосновных носителей.

Таблица 1. Параметры тиристорного модуля М1ТБ-1000

Тип модуля	V_{DRM}/V_{RRM} , В	$I_{T(AV)}/A$ (T_c , °C)	V_{TM} , В	$V_{T(TO)}$, В	r_{T_r} , МОм	Q_{RR} , мкКл	t_{q_r} , мкс	di_t/dt , А/мкс	dv_p/dt , В/мкс	T_{VJM} , °C
М1ТБ-1000	2400	1020 (70)	2,20	1,28	0,29	600	80	300	1000	130

Таблица 2. Параметры диодного модуля М1ДЧ-1000

Тип модуля	V_{RRM} , В	$I_{F(AV)}/A$ (T_c , °C)	V_{FM} , В	$V_{T(TO)}$, В	r_{T_r} , МОм	Q_{RR} , мкКл	T_{VJM} , °C
М1ДЧ-1000	2600	1100 (90)	2,0	1,0	0,19	500	140

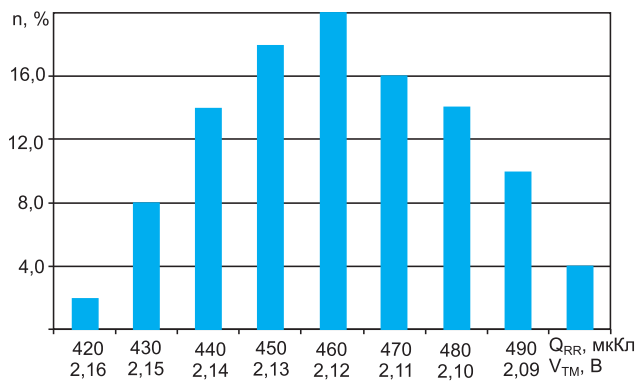


Рис. 3. Гистограмма распределения Q_{RR} и V_{TM} в партии тиристорных модулей М1ТБ-1000

Величину заряда обратного восстановления у полупроводниковых приборов для широкого диапазона значений с хорошей точностью можно считать прямо пропорциональной времени жизни неосновных носителей заряда в *n*-базе. Практически все методы уменьшения времени τ_p в монокристаллическом кремнии основаны на создании дополнительных каналов рекомбинации носителей заряда через ловушки, вводимые в объем кристалла либо путем диффузии, либо радиационными методами при облучении полупроводника пучком частиц высоких энергий [3]. Для уменьшения

коммутационных потерь при выключении тиристорных и диодов, обусловленных конечным временем рассасывания избыточного заряда неосновных носителей, накопленного в *n*-базе кремниевых структур, применялся метод электронного облучения.

Электрические испытания тиристорных модулей показывают высокую степень однородности полученных значений параметров Q_{RR} и V_{TM} внутри партии, что делает их пригодными для группового соединения в схеме преобразователя. При значениях падений напряжения в открытом состоянии V_{TM} = 2,08–2,16 В было

получено распределение заряда обратного восстановления Q_{RR} в партии тиристорных из 100 шт. (гистограмма на рис. 3). Контроль параметров Q_{RR} проводился при максимально допустимой температуре T_{VJM} и скорости спада анодного тока, равной $di_T/dt = -25$ А/мкс.

Основным преимуществом разработанных модулей является оптимальный баланс между малыми статическими потерями (V_{TM}, V_{T(TO)}, r_T) и минимальными потерями процесса обратного восстановления (Q_{RR}).

Зависимости заряда обратного восстановления от скорости спада di/dt для тиристорного и диодного модулей представлены на рис. 4 и 5.

Надежность прибора непосредственно зависит от максимальной температуры полупроводниковой структуры, также на нее влияет и способ отведения тепла. Вследствие одностороннего охлаждения у приборов модульного исполнения возникают ограничения по токовой нагрузке. Для повышения нагрузочной способности по току при заданной максимальной температуре структуры в результате конструктивных решений, применяемых при сборке модулей, обеспечено тепловое сопротивление «переход–корпус» R_{th(j-c)} = 0,03 °С/Вт. Измерение теплового сопротивления «переход–корпус» проводилось согласно ГОСТ 24461-80.

Литература

1. Лукпанов Ж. Электропривод нефтеперекачивающих станций с преобразователями частоты: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Алматы, 2007.
2. Бару А. Ю., Шинднес Ю. Л. Сравнение эффективности применения различных типов полупроводниковых приборов в преобразователях для частотно-регулируемого электропривода // 3 International Scientific and Technical Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. 1997.
3. Гейфман Е. М., Чибиркин В. В. Методы контролируемого регулирования времени жизни неравновесных носителей заряда в производстве силовых полупроводниковых приборов: Уч. пособие. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та. 2002.



Рис. 4. Зависимость заряда обратного восстановления модуля М1ТБ-1000-24 от скорости спада di/dt



Рис. 5. Зависимость заряда обратного восстановления модуля М1ДЧ-1000-26 от скорости спада di/dt