

# Силовые Press-Pack IGBT компании WESTCODE для тяговых электроприводов

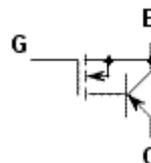
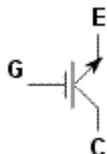
Автор статьи: Юрий Коваль, руководитель технического отдела, фирма СЭА  
E-mail: yurikov@sea.com.ua

**IGBT -модули прижимной конструкции играют особую роль в развитии железнодорожного транспорта. Применение этих перспективных приборов с минимальным весом и габаритами в тяговом преобразователе позволило повысить частоту переключения, упростить схему управления, минимизировать загрузку сети гармониками и обеспечить предельно низкие потери в обмотках трансформатора и дросселей.**



## Структура IGBT

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistors*) - полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого трёхслойная структура. Его включение и выключение осуществляются подачей и снятием положительного напряжения между затвором и истоком. На рис. 1 приведено условное обозначение IGBT.



**рис. 1. Условное обозначение IGBT**    **рис. 2. Схема соединения транзисторов в единой структуре IGBT**

IGBT являются продуктом развития технологии силовых транзисторов со структурой металл-оксид-полупроводник, управляемых электрическим полем (MOSFET-*Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor*) и сочетают в себе два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный (образующий силовой канал) и полевой (образующий канал управления). Эквивалентная схема включения двух транзисторов приведена на рис. 2. Прибор введён в силовую цепь выводами биполярного транзистора E (эмиттер) и C (коллектор), а в цепь управления - выводом G (затвор).

Таким образом, IGBT имеет три внешних вывода: эмиттер, коллектор, затвор. Соединения эмиттера и стока (D), базы и истока (S) являются внутренними. Сочетание двух приборов в одной структуре позволило объединить достоинства полевых и биполярных транзисторов: высокое входное сопротивление с высокой токовой нагрузкой и малым сопротивлением во включённом состоянии.

## Преимущества прижимной конструкции IGBT

Наряду с развитием традиционной технологии паяной конструкции силовых модулей с изолированным основанием продолжает интенсивно развиваться технология прижимной конструкции IGBT- модулей (см. рис.3), подобная таблеточной конструкции тиристоров SCR (Silicon Controlled Rectifier) и GTO (Gate Turn-Off) - *press-pack technology*, в которой наряду с уменьшением более чем в 10 раз теплового сопротивления и габаритов значительно улучшены надёжность, термоциклоустойчивость [1]. Высоких параметров IGBT-модулей прижимной конструкции достигла компания Westcode.

Полное отсутствие проволочных соединений, сварки и пайки позволило принципиально улучшить режим эксплуатации силового кристалла. Каждый отдельный IGBT и диод выполнен в своей ячейке. Параллельное включение таких элементов позволяет получить нужные конечные характеристики модуля. На рис.3, показан модуль на 900 Ампер, 5200 Вольт. Электроды затворов выполнены в виде прижимных золотых контактов,

которые объединяются посредством общей печатной платы.

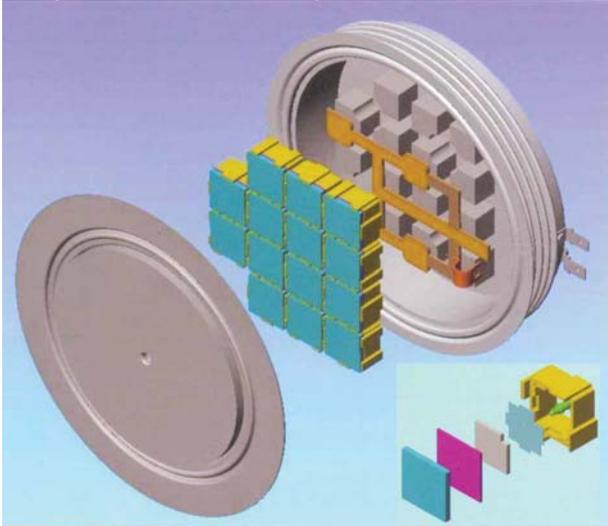


рис.3

Поскольку внутренние базовые элементы имеют одинаковую конструкцию для одного напряжения, то легко могут быть получены специальные конфигурации модуля в одном и том же корпусе. Границы определены только возможностями корпуса и величиной потерь, которые приведены на рис.4.

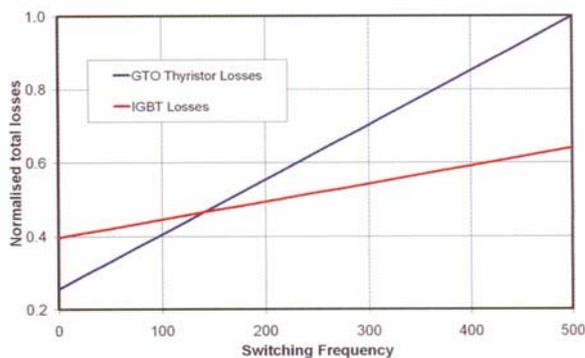


рис.4

Полученные характеристики надежности показывают значительное превосходство перед альтернативными методами изготовления модулей, в том числе и паяных конструкций. Отсутствие проволочных соединений, пайки и сварки устранило основную причину повреждения модулей в процессе эксплуатации: неравномерное распределение тока, термоудар и механическую деформацию от перегрева. IGBT-чипы изготовлены по РТ (punch through) технологии. IGBT - транзисторы, изготовленные по этой технологии, обладают высокой  $du/dt$  стойкостью, и обеспечивает надёжную работу приборов при предельных нагрузках по току и напряжению. Эти транзисторы имеют положительный температурный коэффициент напряжения насыщения, что позволяет успешно использовать IGBT- модули в параллельных соединениях. Внутренняя паразитная индуктивность затвора и эмитера значительно уменьшена по сравнению с обычными выводными IGBT модулями, что делает их более выносливыми при коротких замыканиях по выходной нагрузке. Принципиальным отличием данной технологии является возможность двухстороннего охлаждения кристалла и удвоение эффективности охлаждающей системы. В дополнение, прямое охлаждение эмиттерного контакта подразумевает наличие области безопасной работы SOA в характеристике модуля. Герметичный корпус предлагает другую опцию- возможность погружения модуля во фреон или масло для более эффективного охлаждения.

#### Использование в тяговом электроприводе

Press-pack IGBT позволяют произвести модернизацию существующего оборудования на GTO тиристорах. При этом может быть сохранена прежняя конструкция, схемы контроля и система охлаждения, с заменой только силовых модулей и драйверов управления. Press- Pack IGBT подходят как для приводов постоянного, так и переменного тока, поскольку там используется схожая топология. GTO тиристоры обычно характеризуются максимальным значением контролируемого анодного тока, в то время как IGBT

характеризуются номинальным значением постоянного тока коллектора при максимальной рассеиваемой мощности на заданной температуре. Однако, IGBT может контролировать двойной ток коллектора при включении и выключении. Это означает, что для замены GTO тиристора может быть использован IGBT, у которого токовая характеристика в 2 раза меньше. Рассмотрим для примера 2-х уровневый трехфазный преобразователь с ШИМ на GTO тиристорах. В данном проекте применены 500A Press-pack IGBT (WESTCODE T0500NA25E) для замены GTO тиристоров 1000A (WESTCODE G1000LL250). Нормализованные величины потерь преобразователя показали увеличение потерь проводимости до 150%, но сокращение потерь переключения до 32% по сравнению с GTO тиристорами. При этом, определяющими являются именно потери переключения, где IGBT имеют преимущество начиная с частоты 140 Гц (рис.4). В большинстве случаев, приводная техника работает на частотах более 150Гц, поэтому IGBT являются закономерным выбором для построения современного преобразователя. В дополнение отметим, что система крепления осталась без изменения, поскольку модули выполнены в одном конструктивном исполнении с GTO тиристорами.

### **Трамвай в Варшаве**

Начиная с сентября 2003 года, Институт Электротехники Польши применяет Press-pack IGBT в трамвае в г. Варшава. При этом, для модернизации был заменен только драйвер управления и сам модуль, остальная электроника и конструкция осталась без изменения. Сейчас снятая с производства модель 2500В, 1200А СТО тиристора (WESTCODE WG12025) была заменена на 2500В, 500А IGBT (WESTCODE T0500NA25E). Эти примеры замены стали возможны лишь потому, что изделия были в идентичных корпусах. Каждый трамвай имеет два силовых преобразователя и лишь один был заменен на IGBT, при этом сохранилась полная функциональность всего оборудования.

### **Тяговый электропривод (Польский проект)**

Немного более амбициозный проект был реализован в Польше для модернизации РКР локомотива (см. рис.5).



**рис.5**

Данный локомотив работает от контактной сети 3000 Вольт постоянного тока. Локомотив приводится в движение четырьмя двигателями, объединенными в две группы с последовательным соединением (см. рис.6). Потребляемая мощность нормализуется с помощью входного фильтра, включенного сразу после контактной сети. Напряжение контактной сети может быть увеличено до 4 кВольт с кратковременным значением 5 кВольт, поэтому были использованы последовательно соединенные IGBT на 5200 Вольт (WESTCODE T0850TA52B) с конденсатором для подавления пульсаций. Преобразователь состоит из трех идентичных модулей, каждый из которых состоит из двух последовательно соединенных IGBT и двух диодов. Модуль управляется драйвером C0030BG400 компании WESTCODE с оптическим интерфейсом и изоляцией 10 кВольт. RC снабберные цепи использованы совместно с диодами, IGBT работает без снабберных цепей. Один модуль контролирует ток двух последовательно соединенных двигателей, третий модуль используется для защиты от превышения напряжения. Каждый из модулей собран с использованием алюминиевых радиаторов с хорошей теплопроводностью и компактными размерами (см. рис.7). Устройство собрано из двух submodule: один состоит из IGBT, другой- из диодов, что позволило уменьшить собственную индуктивность конструкции и унифицировать систему крепления элементов. Система

охлаждения собрана в огнебезопасном GPO3 конструктиве в виде трубы, который обеспечивает прямое охлаждения элементов при отсутствии обдува критичных к воздействию поверхностей. При установке системы, два модуля, непосредственно управляющие моторами, были установлены перед трубой системы охлаждения, в то время как модуль контроля напряжения охлаждался естественной конвекцией. Ток двигателя контролировался с помощью ШИМ 400 Гц. Максимальный рабочий ток двигателя- 320А, пиковый ток- 400А. Привод управляется микропроцессором, который обеспечивает нужные функции управления, разгона и торможения двигателей.

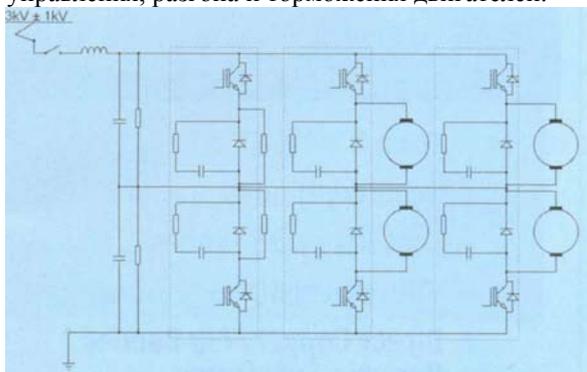


рис.6



рис.7

Преобразователь был протестирован вместе с системой управления и контроля лабораторией IEL в Варшаве (см. рис.7.), обеспечил заданные характеристики во всех режимах и был установлен в локомотив для дальнейшей работы.

### Заключение

На сегодняшний день IGBT как класс приборов силовой электроники занимает, и будет занимать доминирующее положение для диапазона мощностей от единиц киловатт до единиц мегаватт. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором прижимной конструкции (Press-pack IGBT) компании WESTCODE (см. табл.1), выполненные в стандартных таблеточных керамических корпусах, позволяют использовать стандартную конструкцию модуля и системы охлаждения, обеспечивают самый высокий уровень надежности в эксплуатации, предоставляя следующий уровень производительности современных IGBT модулей.

Таблица 1

| Наименование IGBT | VCES | Ic  | ICM | Vce(sat)<br>Ic=Ic | EON<br>Дж | EOFF<br>Дж | V <sub>F</sub><br>I <sub>F</sub> =I <sub>C</sub> | IDM   | tdrr | Qdr | T <sub>JM</sub> | R <sub>THJS</sub><br>Диод<br>К/В | Размеры,<br>Диаметр x<br>высота,<br>мм |       |
|-------------------|------|-----|-----|-------------------|-----------|------------|--|-------|------|-----|-----------------|----------------------------------|--|-------|
|                   | В    | А   | А   | В                 |           | В          | А  | мксек | мкК  | °С  | К/В             |                                  |  |       |
| T0160NA45A        | 4500 | 160 | 310 | 3.8               | 0.5       | 0.42       | 4.5  | 400   | 0.96 | 340 | 125             | 0.056                            | 0.092                                  | 74*26 |
| T0160NA52A        | 5200 | 160 | 320 | 4.1               | 0.4       | 0.33       | 4.3  | 400   | 0.25 | 340 | 125             | 0.056                            | 0.092                                  | 74*26 |
| T0250NA45E        | 4500 | 250 | 400 | 4.5               | 0.72      | 0.84       | нет  | нет   | нет  | нет | 125             | 0.042                            | нет                                    | 74*26 |
| T0250NA52E        | 5200 | 250 | 520 | 4.5               | 0.64      | 0.53       | нет  | нет   | нет  | нет | 125             | 0.042                            | нет                                    | 74*26 |
| T0360NA25A        | 2500 | 360 | 720 | 3.6               | 0.75      | 0.34       | 2.5  | 250   | 0.93 | 285 | 125             | 0.054                            | 0.073                                  | 74*26 |

|                   |      |      |      |      |     |     |     |      |     |      |     |        |        |        |
|-------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|--------|--------|--------|
| <b>T0500NA25E</b> | 2500 | 500  | 1000 | 3.3  | 0.8 | 0.5 | нет | нет  | нет | нет  | 125 | 0.0386 | нет    | 74*26  |
| <b>T0650TA52A</b> | 5200 | 650  | 1300 | 5.1  | 1.7 | 1.4 | 4.1 | 1600 | 2.3 | 1400 | 125 | 0.016  | 0.039  | 112*26 |
| <b>T0900TA52E</b> | 5200 | 900  | 1800 | 4.6  | 2.1 | 1.9 | нет | нет  | нет | нет  | 125 | 0.012  | нет    | 112*26 |
| <b>T1200TA25A</b> | 2500 | 1200 | 2400 | 3.75 | 2.5 | 1.4 | 3   | 670  | 1.5 | 830  | 125 | 0.0169 | 0.0292 | 112*26 |
| <b>T1500TA25B</b> | 2500 | 1500 | 3000 | 3.5  | 3.1 | 2.0 | нет | нет  | нет | нет  | 125 | 0.0136 | нет    | 112*26 |
| <b>T1500TA25E</b> | 2500 | 1500 | 3000 | 3.4  | 3.3 | 1.7 | нет | нет  | нет | нет  | 125 | 0.0132 | нет    | 112*26 |

**Сокращения:**  $V_{CES}$  – максимальное напряжение между коллектором и эмитером,  $I_C$  – максимальный DC ток коллектора при температуре 125°C,  $I_{CM}$  – максимальный импульсный ток коллектора,  $V_{ce(sat)}$  – напряжение насыщения между коллектором и эмитером,  $E_{ON}$  – энергия включения,  $E_{OFF}$  – энергия выключения,  $V_F$  – падение напряжение на диоде в прямом направлении,  $I_{DM}$  – прямой ток диода,  $t_{drr}$  – время восстановления диода,  $Q_{dr}$  – заряд на восстановление диода,  $T_{JM}$  – максимальная температура выводов,  $R_{thjs}$  – тепловое сопротивление между выводами и радиатором

По вопросам заказа IGBT, диодов, тиристоров и предохранителей компании Westcode ([www.westcode.com](http://www.westcode.com)), а также технической поддержки по ним обращайтесь к официальному дистрибьютору в Украине - фирме СЭА, тел 044 575-94-00, e-mail: [info@sea.com.ua](mailto:info@sea.com.ua), [www.sea.com.ua](http://www.sea.com.ua).

Литература:

[1]. F.Wakeman, K.Billett, R.Irons и M.Evans, ‘Electromechanical characteristics of a bondless pressure contact IGBT’ APEC 1999, pp. 312-317