

**Лабораторная работа №5**  
**курса «Силовая электроника».**

**ПАРАМЕТРЫ IGBT ТРАНЗИСТОРОВ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ИЗ DATASHEET**

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ IGBT ТРАНЗИСТОРОВ, РАБОТА С ДАННЫМИ ИЗ DATASHEET**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

IGBT транзисторы применяют в электронных изделиях, работающих с высокими напряжениями и высокой мощностью. IGBT-транзисторы используются в схемах управления двигателями (при рабочей частоте около 20 кГц), источниках бесперебойного питания (с постоянной нагрузкой и низкой частотой), в сварочных аппаратах (где требуется большой ток, а частота не превышает 50 кГц) и других устройствах силовой электроники.

IGBT и MOSFET транзисторы в диапазоне средних мощностей и частот, частично «перекрывают» друг друга. В общем случае, для высокочастотных низковольтных каскадов наиболее подходят MOSFET, а для высоковольтных и более мощных — IGBT.

На рис.1 приведены условные обозначения IGBT транзисторов. На рис.1а – с встроенным антипараллельным быстродействующим диодом (такой диод нужен во многих применениях), на рис.1б – без диода. На рис.1в приведен еще один вариант обозначения IGBT транзисторов.

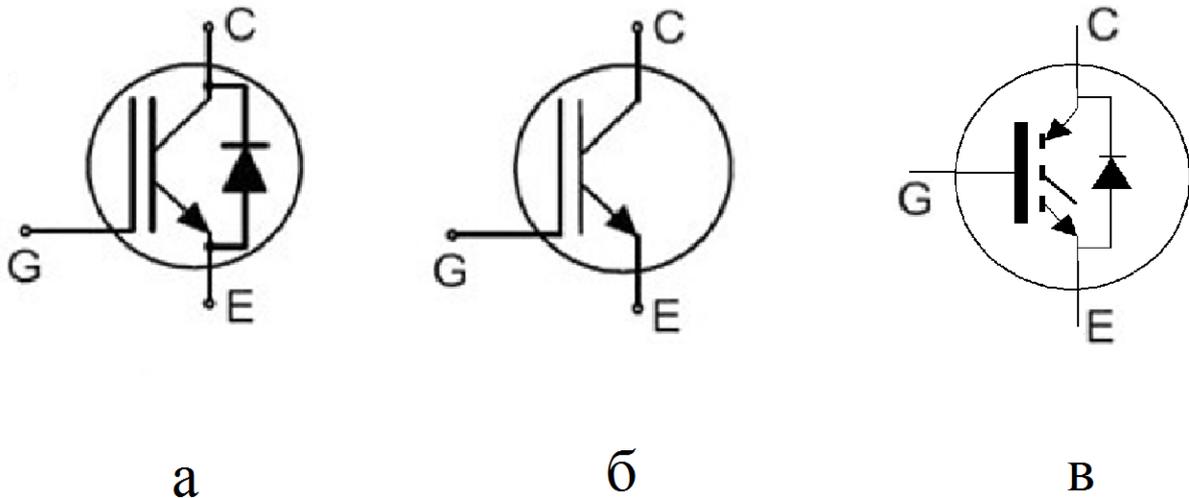


Рис.1 Условные обозначения IGBT транзисторов

Силовые выводы обозначены: E – эмиттер, C – коллектор, а управляющий вывод G – затвор.

### Принцип действия IGBT транзисторов

IGBT транзистор представляет собой устройство в виде оригинального схемотехнического решения. В схему IGBT транзистора, которая изображена на рис.2, входит MOSFET транзистор VT, биполярный n-p-n и биполярный p-n-p транзисторы, соответственно VT1 и VT2. Биполярный p-n-p транзистор VT2 рассчитан на большой ток. Кроме того, схема содержит два резистора R1 и R2. Все эти компоненты и соединения между ними выполнены с применением технологии кремниевых микросхем. Структура из биполярных транзисторов VT1 и VT2 имеет положительную обратную связь, похожую на эквивалентную схему тиристора. Однако выбором номиналов резисторов R1 и R2 эта положительная обратная связь уменьшена до уровня не позволяющего ни при каких условиях этой структуре защелкиваться. Величина резистора R2 получается очень малой, поэтому основной ток течет через него и через транзистор VT2. Эмиттер VT2 является коллектором IGBT транзистора, поэтому ток эмиттера VT2 является одновременно током коллектора IGBT транзистора,  $i_{\text{э}2} = i_{\text{к}}$ . Обозначения и направления всех токов приведены на рис.2. Запишем выражения для токов коллекторов биполярных транзисторов

$$i_{\text{к}1} = i_{\text{э}1}\alpha_1, \quad i_{\text{к}2} = i_{\text{э}2}\alpha_2, \quad (1)$$

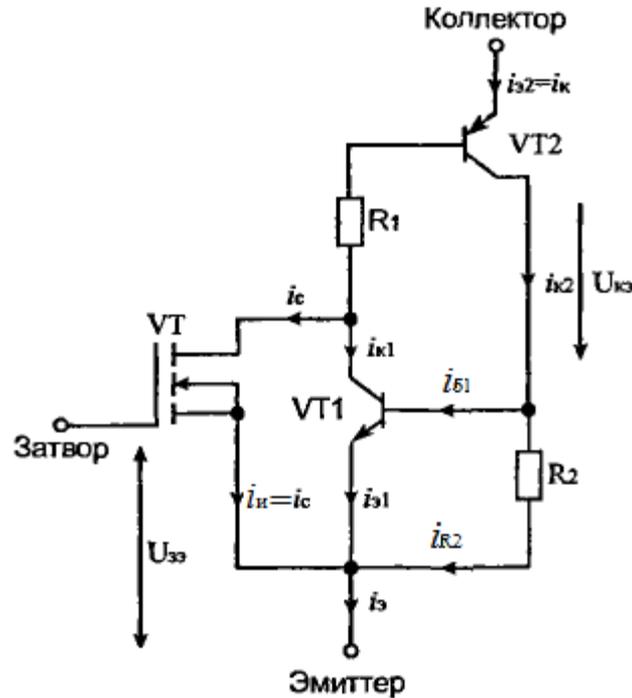


Рис.2. Схема и принцип действия IGBT транзисторов

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  коэффициенты передачи тока эмиттера транзисторов VT1 и VT2 соответственно.

Ток стока полевого транзистора VT  $i_c$  равен току его истока  $i_и$ , т.е.  $i_c = i_и$ , поэтому по второму закону Кирхгофа, как видно из схемы на рис.2, можно записать:

$$i_э = i_{R2} + i_{э1} + i_c$$

с учетом того, что также по второму закону Кирхгофа  $i_{э1} = i_{к1} + i_{б1}$  и  $i_{R2} = i_{к2} - i_{б1}$ , получим выражение для тока стока полевого транзистора VT:

$$i_c = i_э - i_{к1} - i_{к2} \quad (2)$$

Подставив в (2) токи коллекторов биполярных транзисторов из (1) и учитывая, что  $i_{э2} = i_к = i_э$ , где  $i_к$  и  $i_э$  соответственно ток коллектора и эмиттера IGBT транзистора, имеем:

$$i_c = i_3 - i_3\alpha_2 - i_{31}\alpha_1, \quad (3)$$

Третье слагаемое в правой части равенства умножим и разделим на  $i_3$ , после чего перепишем (3) в виде

$$i_c = i_3(1 - \alpha_2 - F)$$

где  $F = i_{31}\alpha_1/i_3$ .

$F$  является функцией, которая зависит от  $R1$ ,  $R2$ ,  $\alpha_1$ ,  $i_{31}$  и  $i_3$ ,

Ток стока  $i_c$  является произведением напряжения затвор-исток полевого транзистора VT на крутизну  $S$  полевого транзистора VT. Поскольку напряжение затвор-исток полевого транзистора VT равно напряжению затвор-эмиттер IGBT транзистора  $U_{33}$ , можно записать

$$i_c = i_3 = SU_{33}/(1 - \alpha_2 - F) = S_{\text{ЭКВ}}U_{33},$$

где  $S_{\text{ЭКВ}} = S/(1 - \alpha_2 - F)$  является эквивалентной крутизной IGBT транзистора. Регулируя в процессе производства резисторы  $R1$  и  $R2$  можно менять положительную обратную связь, и тем самым менять крутизну  $S_{\text{ЭКВ}}$  в широких пределах. Однако с увеличением крутизны IGBT транзистора  $S_{\text{ЭКВ}}$  хотя и ускоряется открывание транзистора, но одновременно увеличивается время рассасывания неосновных носителей в базе р-п-р транзистора, что образует так называемый «хвост», увеличивающий время запираения и повышающий нагрев IGBT транзистора. Кроме того, требуется увеличение так называемого «мертвого времени» в полумостовых сборках на IGBT транзисторах. Поэтому IGBT транзисторы имеют более низкие рабочие частоты, чем полевые MOSFET транзисторы. Однако частотные свойства IGBT транзисторов намного лучше, чем у тиристоров.

## Применение

В настоящее время в силовой электронике IGBT транзисторы применяются в виде электронного мощного ключа в источниках питания, но наибольшей популярностью пользуются IGBT в силовых цепях преобразователей частоты электродвигателей переменного тока мощностью до 1 мегаватта. Современные технологии изготовления дают возможность оптимизировать транзисторы по функциональным характеристикам для самых разнообразных задач силовой электроники. Уже разработаны IGBT транзисторы, способные работать при напряжении до нескольких тысяч вольт и величине тока в тысячи ампер. В силовой электронике применяются IGBT транзисторы с рабочей частотой в несколько десятков кГц. Свойства IGBT транзисторов дают возможность использовать их в частотно-регулируемых приводах станков, инверторах, импульсных регуляторах тока, в сварочных аппаратах. Также IGBT применяются в системах управления мощными тяговыми приводами электровозов, троллейбусов, трамваев. Это повышает их КПД и обеспечивает повышенную плавность хода. Силовые транзисторы широко используются в цепях электрических бытовых устройств. Они входят в состав индукционных электропечей, посудомоечных и стиральных машин, бытовых кондиционеров. В автомобильной технике применяют IGBT транзисторы в силовых ключах автомобильного зажигания, в тяговом электроприводе электромобилей и гибридных автомобилей. Кроме того, их применяют в зарядных устройствах электромобилей и подзаряжаемых гибридных автомобилей.

## Основные параметры

Основные параметры рассмотрим на примере IGBT транзистора STGF8NC60KD, для которого рассмотрим документ завода-изготовителя с параметрами транзистора (Datasheet), который размещен в приложении к этой лабораторной работе. В этом документе в начале приведены общие сведения о транзисторе, затем приведены таблицы с параметрами. В табл. 2 приведены предельные параметры. Это

- Максимальное напряжение между эмиттером и коллектором.

- Наибольший допустимый ток в длительном режиме при 25°С.
- Наибольший допустимый ток в длительном режиме при 100°С.
- Наибольший допустимый ток в импульсном режиме.
- Максимальное напряжение между затвором и эмиттером.
- Предельная рассеиваемая мощность

### Электрические характеристики

- Емкость затвора.
- Управляющее напряжение – номинальная разность потенциалов, способная правильно управлять работой затвора.
- Заряд затвора.
- Напряжение насыщения эмиттер-коллектор.
- Входная емкость.
- Выходная емкость.
- Проходная емкость.
- Паразитная индуктивность вывода коллектора.
- Паразитная индуктивность вывода эмиттера.
- Время задержки включения.
- Время задержки выключения.
- Максимальная рассеиваемая мощность.

### Тепловые характеристики

- Тепловое сопротивление IGBT-корпус.
- Тепловое сопротивление диод-корпус.
- Тепловое сопротивление переходы-окружающая среда.

## **Проверка исправности**

IGBT транзисторы проверяются в случаях неисправности электрического устройства. Проверку проводят с помощью мультиметра путем прозвонки

электродов эмиттера и коллектора в двух направлениях, чтобы проверить отсутствие замыкания в закрытом состоянии. Емкость входа эмиттер-затвор при этом необходимо зарядить отрицательным напряжением. Это делается кратковременным касанием щупа мультиметра «СОМ» затвора и щупа «V/Ω/f» эмиттера. Мультиметр должен быть в режиме прозвонки диодов.

Чтобы произвести проверку, также нужно убедиться, работает ли в открытом режиме транзистор. Для этого надо зарядить емкость затвор-эмиттер напряжением 5 – 15В (на затвор подавать плюс этого напряжения). Далее мультиметром в режиме прозвонки диодов проверить падение напряжения коллектор-эмиттер. Плюс омметра подключать к коллектору.

## IGBT модули

Силовые транзисторы производятся не только в виде отдельных полупроводников, но и в виде модулей. В модуле содержатся IGBT транзисторы, с силовыми и управляющими выводами. Корпус модуля выполнен в виде конструкции, предназначенной для крепления на радиаторе с воздушным или жидкостным охлаждением. Модули бывают с одиночными транзисторами, в виде полумоста и в виде трехфазного моста. Такие модули входят в состав частотных преобразователей для управления электромоторами.



## Интеллектуальные модули (IPM)

- это модули с интегрированным драйвером затвора, защитными и диагностическими функциями.

Они отличаются следующими особенностями:



- модули изготавливаются по гибридной технологии;
- защита от КЗ использует сенсор тока эмиттера;
- защита по цепям питания;
- защита от перегрева;
- новый драйвер затвора управляет  $du/dt$  в зависимости от тока эмиттера;
- выход сигнала ошибки.

IPM выпускаются на напряжения 650/1200/1700 В в конфигурациях 3-фазный инвертор + тормозной ключ или 3-фазный инвертор.

### **Параллельное включение IGBT**

При параллельном включении нескольких IGBT удастся уменьшить потери проводимости и снизить тепловое сопротивление. В то же время потери при переключениях, наоборот, увеличиваются. Таким образом, если основной вклад

в общие потери вносит динамическая составляющая, то использование параллельного включения позволит улучшить только тепловые характеристики.

Параллельное включение МОП-транзисторов можно выполнить без особых проблем из-за положительного температурного коэффициента их потерь проводимости, в то время как потери на переключения для MOSFET в значительной степени не зависят от температуры. У IGBT наблюдается обратная картина – потери проводимости слабо зависят от температуры, зато потери на переключение имеют значительный положительный температурный коэффициент. По этой причине использование параллельного включения IGBT оказывается не таким простым, как для МОП-транзисторов.

Напряжение насыщения  $V_{CE(on)}$  в IGBT слабо зависит от тока и температуры, в то время как для МОП-транзисторов падение напряжения на открытом канале сильно зависит от обоих параметров. Когда два IGBT работают параллельно, напряжение  $V_{CE(on)}$  для обоих транзисторов будет одинаковым. Таким образом, при заданной нагрузке через один IGBT может протекать больше тока, чем через другой. Эта разбалансировка для малых значений токов очень часто оказывается достаточно значительной. Само по себе неравномерное распределение токов не является критическим, однако это оказывает значительное влияние на перегрев и потери на переключения. Поскольку падение напряжения одинаково для обоих IGBT, то транзистор, через который протекает больше тока, рассеивает большую мощность и имеет больший перегрев кристалла. Это смягчается тремя факторами:

1. Неравномерное распределение нагрузки имеет тенденцию к уменьшению по мере увеличения тока. Это связано с тем, что разница в напряжениях насыщения сокращается с ростом тока. Таким образом, значительная разбалансировка при малых токах оказывается не такой значительной при больших токах.

2. Обеспечение хорошей тепловой связи между кристаллами транзисторов гарантирует, что, несмотря на значительный дисбаланс токов, температурный перепад будет находиться в пределах нескольких градусов.
3. Существуют IGBT с небольшим положительным температурным коэффициентом. Они становятся оптимальным выбором, если требуется параллельное включение транзисторов.

Рассмотрим потери на коммутацию при рассогласовании токов: Очевидно, что IGBT, который проводит больше тока, переключается также при большем токе. Следовательно, на него будет приходиться не только большая часть потерь проводимости, но большая часть динамических потерь на переключения. Казалось бы, существует лавинообразный процесс, который должен привести к тому, что из-за более высоких потерь температура перегруженного IGBT превысит допустимое значение. Однако аналитический и экспериментальный анализ показал, что с увеличением тока дисбаланс между транзисторами уменьшается, а отличие температур сокращается до нескольких градусов. Это, как было сказано выше, связано с выравниванием напряжений насыщения при увеличении токовой нагрузки.

Стоит отметить, что наиболее эффективным методом борьбы с неравномерным распределением токов при параллельном включении является отбор транзисторов с близкими значениями напряжения насыщения  $V_{CE(on)}$ . Еще одной важной причиной разбалансировки являются различия в пороговых напряжениях  $V_{GS(th)}$ , что особенно заметно у trench-IGBT. Таким образом, подбор транзисторов с согласованными значениями  $V_{CE(on)}$  и  $V_{GS(th)}$  является эффективным способом защиты от неравномерного распределения токов.

При параллельном соединении IGBT транзисторов следует:

- Убедиться, что транзисторы, включенные параллельно, имеют сильную тепловую связь.

- Выравнивать значения общей индуктивности эмиттера и уменьшать ее до величины, которая не оказывает большого влияния на общие потери коммутации на заданной частоте.
- Минимизировать индуктивность рассеяния до значения, которое обеспечивает допустимое значение выбросов напряжения при максимальном рабочем токе.
- Схема управления должна иметь минимальное выходное сопротивление.
- Конденсаторы в цепи затвора замедляют коммутацию, тем самым увеличивая рассогласование между устройствами, а также могут вызывать колебания.
- Паразитные составляющие должны быть минимизированы. Проводящий рисунок печатной платы и электрические соединения должны быть максимально симметричными для всех транзисторов.

### **IGBT транзисторы с датчиком тока**

Также, как и в MOSFET транзисторах, мощные IGBT транзисторы состоят из большого числа одинаковых параллельно соединенных маломощных транзисторов, через которые текут одинаковые токи.

Поэтому, аналогично MOSFET транзисторам можно контролировать ток только одного из множества IGBT транзисторов и потом умножать полученный ток на число транзисторов. Такой способ часто применяют в IGBT модулях с токовой защитой.

### **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Для выполнения работы понадобится двухканальный источник питания или два одноканальных источника с регулируемым напряжением до 30В и регулируемым током до 3А. Кроме того, необходимо иметь кроме встроенных в блок питания вольтметров и отдельный вольтметр для измерения напряжения непосредственно на электродах транзистора.

Также возможно применение токоограничивающих резисторов, если в блоках питания нет ограничения тока.

Для выполнения работы понадобится испытуемый транзистор STGF8NC60KD.

### СХЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ IGBT ТРАНЗИСТОРОВ

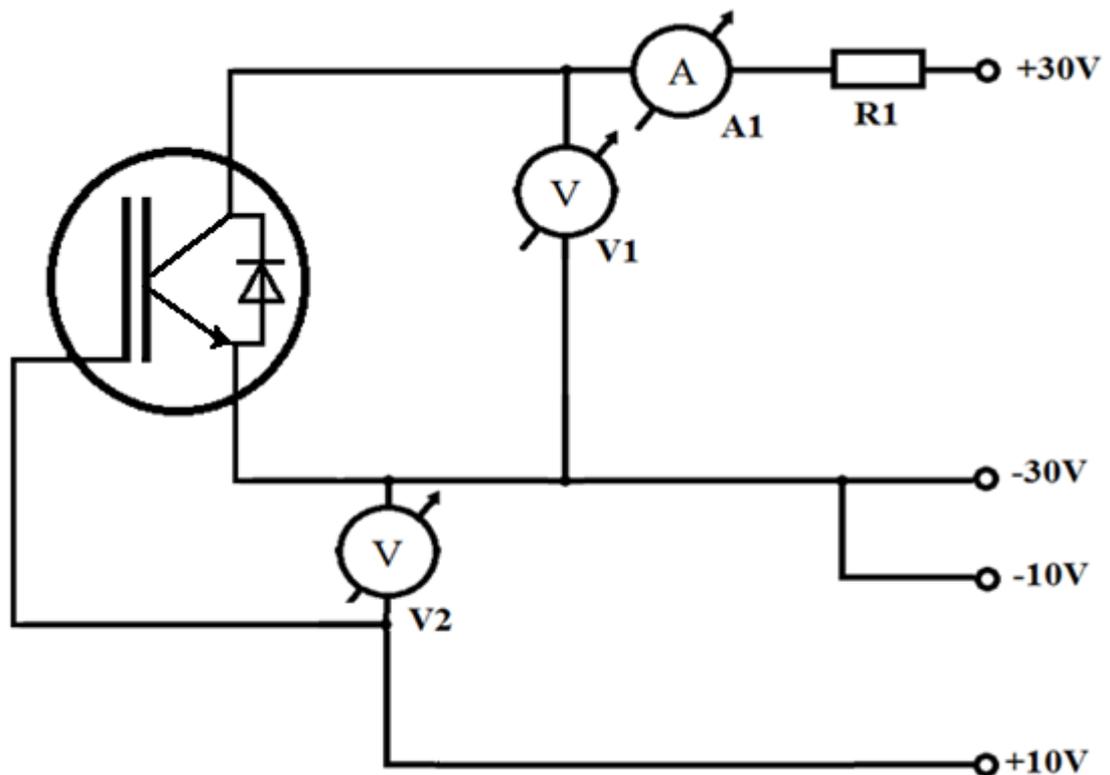


Рис. 10. Схема для снятия параметров IGBT транзисторов

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Собрать схему согласно Рис.10.  $R1=10$  ом. Ток можно измерять встроенными в блок питания амперметрами. В начале для транзистора STGF8NC60KD снимем выходные вольтамперные характеристики (ВАХ) в запертом состоянии. Для этого надо менять напряжение подаваемое на

клеммы +30В и –30В (коллектор-эмиттер транзистора), чтобы снять зависимость  $I(U)$ . Питание на клеммы +10В и –10В (затвор-исток) установить 0В). Если установка напряжения не позволяет получить 0В, затвор закоротить на эмиттер. График  $I(U)$  в декартовых координатах по этим точкам будет в виде прямой линии, проходящей вблизи оси абсцисс (оси напряжения). Далее следует снять выходные характеристики транзистора при значении напряжения затвор-исток 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 и 16 вольт. Для этого, меняя напряжение сток-исток, снять зависимость тока стока (амперметр А1) от этого напряжения (вольтметр V1). Снять надо 5 - 6 точек для каждой характеристики (каждого значения напряжения затвора).

Далее следует, используя ту же схему снять зависимость тока коллектора от напряжения затвора (передаточную ВАХ).

Также необходимо измерить напряжение коллектор-эмиттер при различных напряжениях затвор-эмиттер для определения напряжения насыщения.

## ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТЫ

По данным, полученным в процессе выполнения работы построить ВАХ в координатах: ось абсцисс напряжение коллектор-эмиттер, ось ординат ток через транзистор. При построении ВАХ транзистора наносятся на график и точки закрытого прибора и точки открытого прибора. Точки соединяют сплошными линиями.

Под графиком привести полученные для данного транзистора значения напряжения насыщения эмиттер-коллектор при различных значениях напряжения затвора. Указать, какое управляющее напряжение затвора является минимально-допустимым.

Построить передаточную ВАХ и определить крутизну  $S$ .

$$S = \frac{I_c}{U_{зи}}$$

Значения  $U_{зи}$  и  $I_C$  брать в точках линейного участка передаточной ВАХ.

Сделать заключение о минимально допустимом значении напряжения затвора, т.е. напряжения, после увеличения которого, напряжение насыщения перестает заметно уменьшаться.

Изучить datasheet (см. приложение), сравнить полученные ВАХ с заводскими графиками. Также сравнить с заводскими полученные значения напряжения насыщения и крутизны.