

УДК 621.31

Л.В. КАРПОВА, І.В. ГУЛА  
Хмельницький національний університет

## ЗАСТОСУВАННЯ IGBT ТРАНЗИСТОРІВ ДЛЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ У СИЛОВІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ

*Проведений аналіз проблеми використання різних типів транзисторів у силовій електроніці показує, що сьогодні транзистори типу MOSFET і IGBT, складають основу силової перетворювальної техніки. Без використання даних типів транзисторів неможливо розробка силової апаратури, яка відповідає сучасним вимогам. Наведені рекомендації, щодо застосування транзисторів типу MOSFET і IGBT у силовій перетворювальній техніці.*

*Ключові слова:* транзистор, IGBT, MOSFET.

L.V. KARPOVA, I.V. GULA  
Khmelnytsky national university, Khmelnytsky, Ukraine

## USAGE OF IGBT TRANSISTOR FOR CONTROLLING IN POWER ELECTRONICS

*Power systems increased its power during last years. We use power transforming systems to supply energy from AC or DC inputs to AD or DC outputs like UPS, Solar power stations, hydroelectric stations and so on. The analysis of the problems shows to us how difficult to choose adequate radio elements for such types of transforming systems. For now, world market provides access to numerous transistors based on MOSFET and IGBT technologies. For now, IGBT produced from generation 4 to generation 8. Selection of correct type of power transistor that meets modern requirements proposed at this article.*

*Keywords:* transistor: IGBT, MOSFET.

### Вступ

Електроенергетика в сучасному світі зайняла настільки важливе місце, що ми уже не уявляємо, яким чином можна обійтися без електричної енергії в цивілізованому суспільстві, насиченому технічними засобами, що полегшують нам життя. Відповідно, завдання перетворення електроенергії сьогодні настільки широкі і різноманітні, що в цьому напрямку працює величезна кількість розробників-інженерів, безліч фірм поставляє на ринок перетворювачі напруги, струму, частоти з колосальними діапазонами потужностей - починаючи від декількох ватів і закінчуючи сотнями кіловат. Тому цілком природно, що перетворювачі електроенергії сьогодні можна зустріти в усіх галузях промисловості, на транспорті, в побуті. Сучасне промислове виробництво немислиме без частотних перетворювачів швидкості обертання електродвигунів. Не обійтися без перетворювачів електричної енергії і на сучасному електротранспорті.

### Проблеми дослідження

На сьогодні широкого застосування набули системи із значним споживанням або генерацією електричної енергії та швидкої зміни своїх параметрів [1, 2, 3]. Елементами таких систем можуть виступати: електротранспорт, джерела живлення, джерела безперебійного живлення, перетворювачі енергії для сонячних електростанцій та гідроелектростанцій. Для таких систем зазвичай потрібні силові елементи, які здатні комутувати великі струми та напруги. При цьому потрібно забезпечити у вузлах перетворення електричної енергії виконання такої типової дії, як ввімкнення та вимкнення. Частота таких перемикачів сягає 1000 Гц та вище.

До 90-х років XX століття в якості силових напівпровідникових приладів, для ввімкнення таких споживачів, окрім тиристорів та симісторів також використовувалися біполярні транзистори. Біполярні транзистори на 800-1000 В є відомим технічним рішенням, проте їх ефективність є обмеженою кількома причинами:

- необхідність великого струму бази для ввімкнення;
- наявність залишкового струму замикання, оскільки струм колектора не зменшується миттєво після зняття струму керування - з'являється опір в колі колектора, що призводить до нагріву транзистора;
- значна залежність параметрів біполярного транзистора від температури;
- напруга насичення кола колектор-емітер обмежує мінімальну робочу напругу.

Поява потужних біполярних силових транзисторів типу MJE13001, MJE13005 та аналогічних їм, дозволила частково розв'язати проблему в області високих напруг та малих і середніх струмів. Проте з великими струмами такі транзистори не працюють.

Польові транзистори з'явилися в силовій схемотехніці значно пізніше своїх старших побратимів - біполярних транзисторів. Тим не менш, сьогодні вони прагнуть зайняти провідне положення в класах силової перетворювальної техніки, що працюють з напругою до 500 В. Принциповою відмінністю MOSFET типу POWERFET® [1] від біполярного транзистора є принцип керування, польовий транзистор керується не струмом, а прикладеною напругою. Транзистори типу MOSFET порівняно з біполярними транзисторами мають безліч незаперечних переваг, серед яких основними є наступні:

- оскільки MOSFET керується не струмом, а електричним полем, це дозволяє значно спростити схему керування і знизити витрачену на керування потужність;

- в польових транзисторах відсутня інжекція неосновних носіїв в базову область, тому вони можуть перемикатися з більш високою швидкістю;
- оскільки польові транзистори термостійкі, тобто з ростом температури збільшується опір їх каналу, це дозволяє реалізовувати паралельне з'єднання MOSFET для збільшення навантажувальної здатності;
- польові транзистори можуть працювати в широкому діапазоні струмів (від міліампер до сотень ампер);
- в польових транзисторах відсутній вторинний пробій, тому область їх безпечної роботи ширше, ніж у біполярних транзисторів.

Суттєві недоліки транзисторів MOSFET – обмеження по максимальній робочій напрузі, а також проблема пов'язана з технологією їх виготовлення. До теперішнього часу технологічно не вдається їх виготовити без деяких паразитних елементів, одним з яких є внутрішній паразитний біполярний транзистор. Наявність паразитних міжелектродних ємностей викликає ефект «гальмування» транзистора при перемиканні, і чим потужніший транзистор, тим складніше забезпечити його швидкодіюче перемикання. На рис.1 показано умовні графічні позначення транзисторів MOSFET [1, 2].

Деякі розробники вважають діод у структурі MOSFET спеціально вбудованим захисним елементом, називаючи його швидкодіючим діодом Шотткі. Провідні виробники елементної бази постійно ведуть боротьбу за поліпшення характеристик швидкодії зворотних діодів, і їх вплив стає все менш помітним, проте переважна більшість польових транзисторів, що випускаються на сьогоднішній момент, все ще мають паразитні діоди з досить великим часом зворотного відновлення. Цей вбудований діод утворюється з технологічного біполярного транзистора, ввімкненого паралельно силовим електродам польового транзистора, проте вбудований діод виявляється занадто повільним. Тому доводиться витратити додаткову енергію на його закриття, що веде до нагрівання транзистора в цілому.

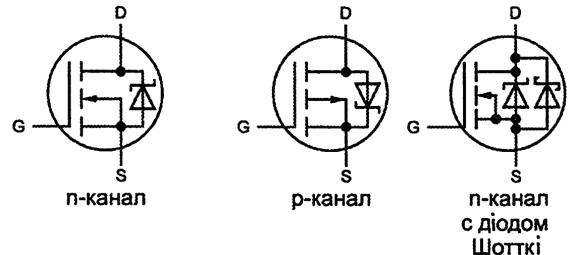


Рис. 1. Графічне позначення транзисторів MOSFET з паразитним діодом [4]

### Основний розділ

Поява транзисторів IGBT вирішила існуючу десятиліттями проблему забезпечення потужних високовольтних силових схем надійним ключовим елементом, що володіє високою швидкодією, малими витратами енергії на керування, стійкістю до багаторазових струмових перевантажень і повною керованістю (при ввімкненні і вимкненні), а також відкрило величезні перспективи для створення високо надійних статичних перетворювачів потужності.

У тих областях, де потрібне поєднання високих робочих напруг і струмів, домінують IGBT силові транзистори. Вони можуть використовуватися у вигляді дискретних приладів, безкорпусних кристалів у складі гібридних силових модулів та інтелектуальних силових модулів різних електроприводів [4].

Перший промисловий зразок біполярного транзистора з ізольованим затвором був запатентований International Rectifier в 1983 році [1]. Пізніше, в 1985 році, був розроблений IGBT з повністю плоскою структурою (без V-каналу) і більш високими робочими напругами [4]. Це сталося майже одночасно в лабораторіях фірм General Electric в місті Скенектаді (штат Нью-Йорк) і в RCA в Принстоні (Нью-Джерсі). Спочатку пристрій називали COMFET, GEMFET або IGFET. У 80-х роках XX століття прийняли назву IGBT. IGBT першого покоління (1985 рік) не набули поширення через ряд вроджених вад - повільного перемикання і низької надійності. Друге (1990-ті роки), третє і сучасні 6, 7, 8 покоління IGBT в цілому позбулися цих вад [5].

IGBT поєднує переваги біполярних і MOSFET транзисторів:

- високий вхідний опір, низький рівень керуючої потужності - від MOSFET;
- низьке значення залишкової напруги у ввімкненому стані - від біполярних транзисторів;
- малі втрати у відкритому стані при великих струмах і високих напругах;
- характеристики перемикання і провідність біполярного транзистора;
- керування, як у MOSFET - напругою.

Частотний діапазон можливих застосувань IGBT приладів поділений на кілька ділянок, для яких і були створені прилади з оптимізованими параметрами [1]. На погляд автора, найбільш вдалий поділ провела фірма «International Rectifier», виключивши ситуації, пов'язані як із занадто великою, так і з надто малою кількістю «швидкісних» ділянок. В результаті поділу були визначені лише 4 класи, які маркуються відповідними літерами в позначенні серійних приладів і розраховані на наступні діапазони частот комутації:

- W (warp speed) — 75... 150 кГц;
- U (ultra speed) — 10...75 кГц;
- F (fast speed) — 3...10 кГц;
- S (standard speed) — 1...3 кГц.

Тому на питання про порівняння швидкостей перемикання IGBT і біполярних транзисторів тепер можна відповісти наступне: IGBT транзистори класу S поступаються біполярним приладам по швидкодії,

Таблиця 1

## Вимоги до параметрів IGBT-транзисторів для різних секторів застосування [6, 7, 8]

| Область застосування                  | Сектора                                        | Напруга живлення, В | Напруга в перетворювачах $S_W$ , В | Частота, Гц | $T_{sc}$ , мкс | Покоління IGBT |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------------|----------------|----------------|
| Електроприлади                        | Промисловий сектор                             | 240                 | 600                                | 4000-16000  | 10             | 5; 6.2; 6.2i   |
|                                       |                                                | 480                 | 1200                               |             | 10             | 5; 6.7K        |
|                                       | Побутовий сектор                               | 110                 | 330                                | 3000        | 2              | 6              |
|                                       |                                                | 230                 | 600                                |             |                | 6.2; 6.8; 4F   |
|                                       | Гібридні автомобілі                            | 240                 | 600                                | 20000       | 6              |                |
|                                       |                                                | 480                 | 1200                               |             | 6              | 6.8            |
| Джерела безперебійного живлення (UPS) |                                                | 230                 | 600                                | 20000       | -              | 6.2            |
|                                       |                                                | 480                 | 900                                | 50/60       | -              | 6.7U           |
| Інвертори сонячних батарей            |                                                | 600                 | 20                                 | 50/60       |                | 5; 6.2         |
|                                       |                                                |                     | 600                                |             | -              | 4S             |
|                                       |                                                |                     | 1200                               | 20000       | -              | 5; 6.7         |
|                                       |                                                |                     | 1200                               | 50/60       | -              | 4S             |
| Керування освітленням                 | Електронний баласт для ксенонового авто світла | 12                  | 600                                | <400000     | -              | 4S; 6.8S       |
| Джерела живлення                      | Мостового типу                                 | 400                 | 600                                | >20         | -              | 5; 6.2         |
|                                       |                                                | 800                 | 1200                               | >20         | -              | 5; 6.3         |

Розглянемо застосування сучасних IGBT транзисторів у різних застосуваннях, відповідно до їх класифікації. Наприклад, як перетворювачі енергії у сонячній енергетиці. В даний час сонячні батареї знайшли активне застосування як джерело електроенергії, обсяги їх продажів рік від року неухильно зростають. Сонячні батареї утворені з модулів сонячних фотоелементів, що забезпечують напругу від 12 до 100 В і робочі струми до декількох десятків ампер. У промислових застосуваннях (наприклад, опріснювачі морської води) використовуються сонячні батареї з вихідним напругою від 24 до 100 В і потужністю в декілька кіловат. Схема перетворення сонячної енергії така: сонячна батарея-буферний акумулятор-інвертор (DC/AC-конвертор) 220/380 В-промислова установка, що живиться від мережі 220/380 В. На рис. 2 показана структура DC/AC-інвертора для сонячних батарей.

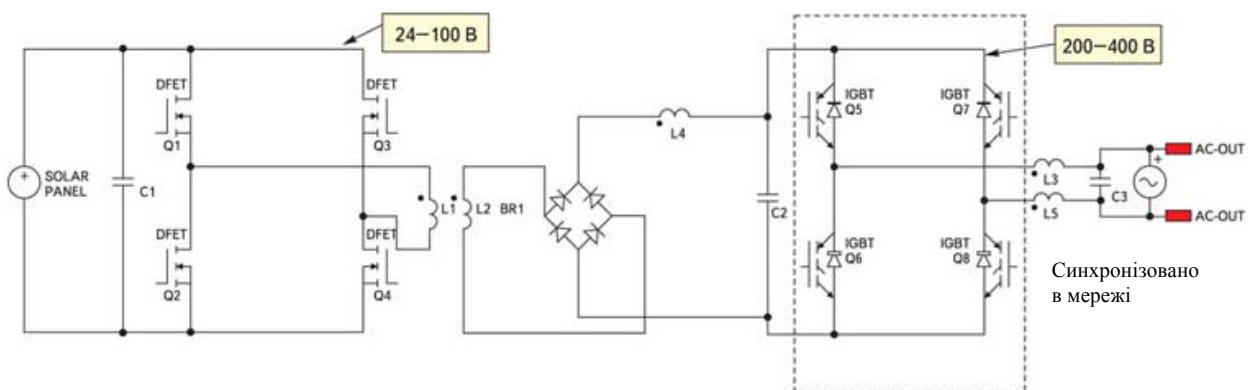


Рис. 2. Схема перетворення сонячної енергії [7]

На рис.3 показана типова схема керування асинхронним електродвигуном за допомогою контролера та генератора живлення змінної частоти. Такий модуль керування може бути використаний в пральних машинах, компресорах холодильників або кондиціонерів. В якості силових ключів у схемі використовуються Trench [1, 7, 8] IGBT-транзистори.

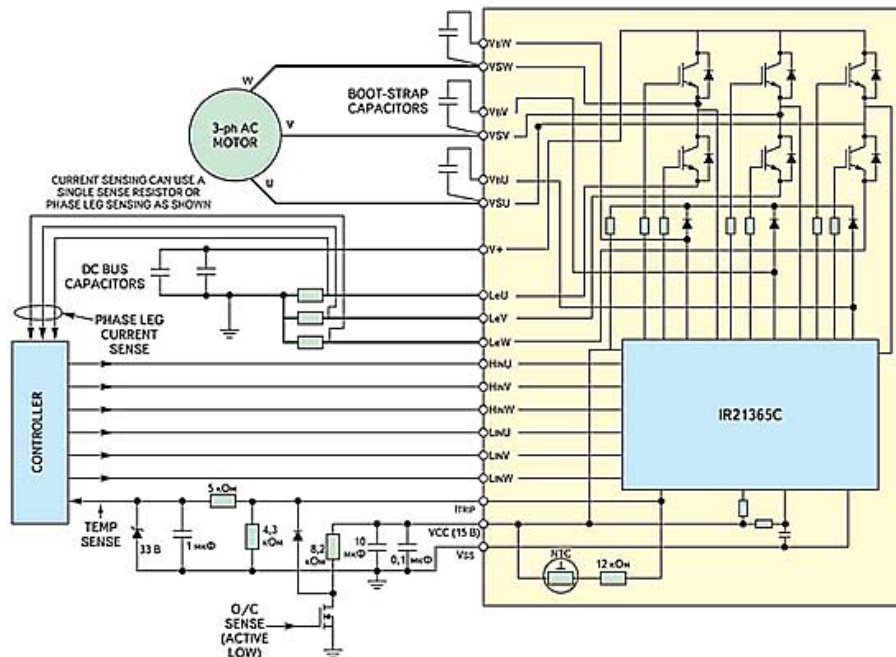


Рис. 3. Типова схема керування асинхронним електродвигуном потужністю від 250 Вт до 2 кВт за допомогою інтелектуального приводу[7]

### Розв'язок проблеми

Основне питання, яке виникає у розробників, котрі не використовували раніше IGBT – в якому разі застосовувати їх, яке покоління IGBT транзисторів є виправданим, а де варто використовувати класичні MOSFET. Для того, щоб розібратися, проведемо аналіз параметрів IGBT і MOSFET транзисторів:

$V_{ECS}$  (Collector-to-Emitter Breakdown Voltage) - максимально-допустима напруга «колектор-емітер». Є аналогом параметра  $V_{DS}$  MOSFET-транзисторів. Значення цього параметра для IGBT знаходиться в межах 300 ... 1500 В.

$I_C$  (Continuous Collector Current) - максимальний струм колектора, аналог струму стоку  $I_D$ . Діапазон значень для IGBT - 10 ... 200 А.

$V_{GE}$  (Gate-to-Emitter Voltage) - максимально допустима напруга «затвор-емітер», аналог параметра  $V_{GS}$ . Значення  $V_{GE}$  знаходяться в межах  $\pm 20 \dots \pm 30$  В.

$V_{CE(on)}$  (Collector-to-Emitter Saturation Voltage) - напруга насичення «колектор-емітер», визначає втрати провідності в транзисторі, аналог  $R_{DS(on)}$  для MOSFET. Діапазон значень  $V_{CE(on)}$  1,0...2,5 В.

$E_{ts}$  (Total Switching Loss) - повні втрати на перемикання транзистора (вимірюється в мкДж). Аналогом у MOSFET є заряд затвора  $Q_g$ .

$P_d$  (Maximum Power Dissipation) - максимально можлива потужність розсіювання. Як і у випадку MOSFET-транзисторів, значення даного параметра в значній мірі визначається типом корпусу транзистора.

Особливістю IGBT-транзисторів є зниження значень параметра, що є еквівалентом опору каналу MOSFET зі збільшенням струму, що протікає в IGBT-транзисторі. Для прикладу, порівняємо MOSFET (IRFB4321 та IRFB4227) з IGBT 7-покоління (IRG7C3430U). Параметри взяті з відповідних документів виробника. При струмах понад 33 А значення еквівалента  $R_{DS(on)}$  IGBT-транзистора стає нижче реальних значень  $R_{DS(on)}$  для MOSFET з напругою 150 В, що дозволяє отримати додаткову ефективність при використанні IGBT. Збільшення напруги до 200 В при будь-яких струмах втрати в IGBT-транзисторі є значно нижчі. Однак нарівні з виділеними вище перевагами IGBT-

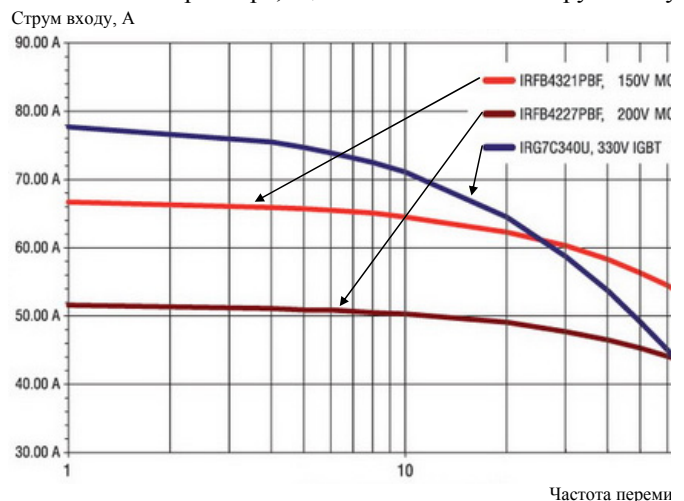


Рис. 3. Порівняння робочих струмів IGBT і MOSFET на різних частотах

транзистори програють MOSFET по швидкодії. На відміну від MOSFET, здатних працювати на частотах у кілька мегагерц, межею IGBT є поріг в 30 ... 40 кГц з істотним погіршенням струмової характеристики на частотах понад 20 кГц. Даний факт ілюструє рис. 3.

### Покоління IGBT-транзисторів

Технологія виготовлення кристалів IGBT-транзисторів налічує кілька поколінь. Для кожного покоління характерні свої виробничі процеси і у готових транзисторів кожного з поколінь є свої сильні сторони. Головним цільовим показником, на який орієнтувалося вдосконалення технологічних процесів, було зниження втрат в IGBT-транзисторі. Дана мета вимагає зниження напруги насичення між емітером і колектором повністю відкритого транзистора, що, в свою чергу, тягне за собою необхідність зниження напруги відсічки в структурі польового транзистора і зменшення диференціального опору. Для цього від покоління до покоління товщину структури IGBT-транзистора намагалися зменшувати.

В даний час склалася унікальна для електроніки ситуація - на ринку присутні відразу п'ять поколінь IGBT-транзисторів IR. В дві лінійки з них - Gen4 і Gen5 - складаються з планарних транзисторів, дві інших - Gen6 і Gen7 - з Trench-транзисторів, а новітнє покоління Gen8 розроблено на базі нового матеріалу GaN. При цьому різні покоління взаємно доповнюють один одного, і попередні покоління не збираються поки сходити з дистанції [1].

Найстаршим, яке нині випускається, є четверте покоління IGBT. Воно розроблялося для нескладних індустріальних застосувань, електрозварювання та керування моторами. Найбільш універсальні IGBT-компоненти п'ятого покоління. У цьому поколінні представлені транзистори, розраховані, як на великі напруги, так і на високі частоти. Це покоління IGBT міцно влаштувалося в деяких побутових застосуваннях, таких як системи кондиціонування, джерела безперебійного живлення.

Впровадження IGBT-модулів в побутову техніку вело до зниження втрат, при цьому вимоги до максимального значення напруги і частоти перемикання знижувалися. Це знайшло втілення в шостому поколінні IGBT. Виготовлені за даною технологією транзистори перемикаються з напругою не вище 600 В, при цьому частота перемикання не перевищує 30 кГц. Шосте покоління відрізняється тим, що витримує великі пікові навантаження, що важливо для зварювання, а також для використання в системах електроприводу.

На момент створення сьомого покоління IGBT на піку актуальності набула альтернативна енергетика - головним чином, використання енергії сонця. Вимагалось підвищити ККД перетворювача, для чого в транзисторах були зменшені втрати провідності та перемикання. Крім цього, верхня межа напруги була підвищена до 1200 В.

Найновіше, восьме покоління IGBT було представлено компанією IR в 2014 році. При щільності струму 150 А/см<sup>2</sup> напруга між емітером і колектором повністю відкритого транзистора восьмого покоління становить 1,95 В проти приблизно 2,7 В у транзисторів попереднього покоління. Основна мета, заради якої були покращені параметри транзисторів - це їх застосування в потужних перетворювачах і джерелах безперебійного живлення, що використовуються в промисловості. Для промислового обладнання важливим є підвищення ККД

перетворювача навіть на кілька відсотків. А ось максимальна частота перемикання може бути менше 10 кГц. Тому восьме покоління IGBT має мале падіння напруги між колектором і емітером, здатне комутувати високі напруги, але програє трьом попереднім поколінням у швидкодії. Менші втрати - це не тільки більш високий ККД системи електроживлення, менше нагрівання модуля. А це означає, що інверторні перетворювачі можна зробити компактніше і дешевше за рахунок спрощення системи тепловідведення.

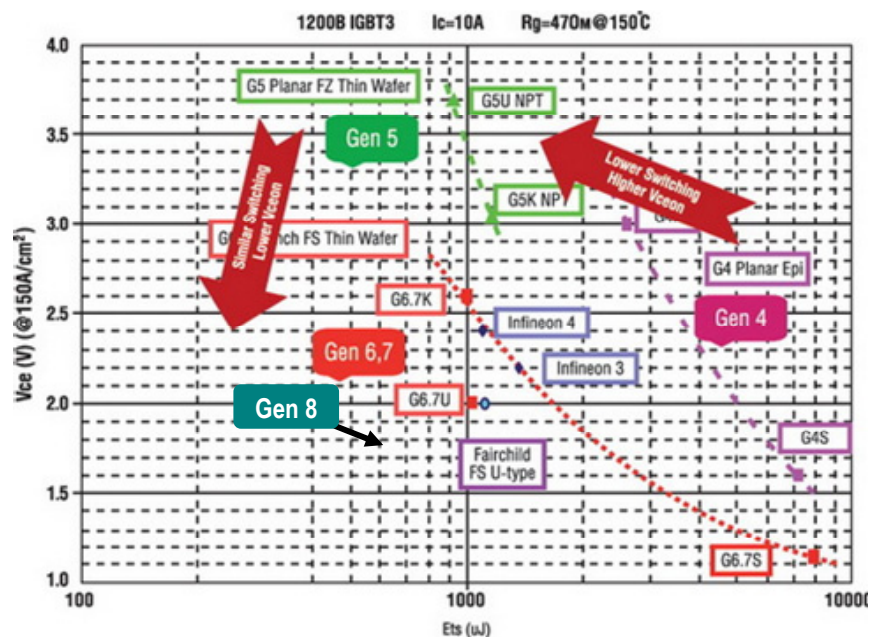


Рис. 4. Порівняння придатності до застосування за енергетичними показниками різних поколінь транзисторів

Класифікація параметрів поколінь IGBT-транзисторів наведена на рис. 4. З рис. 4 видно, що перехід від 4-покоління (G4), що виготовляється за Punch-Through (PT) технологією, до 5-покоління (G5), що виготовляється за Non-Punch-Through (NPT) технологією, супроводжується дев'ятикратним зменшенням

втрат на перемикання (параметр  $E_{ts}$ ) і збільшенням втрат на провідність в 1,5 рази. Таким чином, покоління G5 більше підходить для застосування в схемах з більш високими робочими частотами, ніж G4. Перехід до нових технологій FS Trench (6-покоління, G6) і Epi-Trench (7-покоління, G7), дозволив створити IGBT, які поєднують в собі переваги попередніх поколінь і володіють низькими значеннями  $E_{ts}$  без збільшення втрат провідності. Крім того, падіння робочого струму транзистора зі збільшенням частоти у нового покоління G7 виражено не так яскраво, як у транзисторів попередніх поколінь або у IGBT-транзисторів інших виробників.

Восьме покоління IGBT (G8) здатне комутувати високі напруги (1400 В), але програє трьом попереднім поколінням у швидкодії. Таким чином, перехід до технологій восьмого покоління дозволяє значно знизити втрати при комутації і встановити втрати провідності на рівні кращих зразків попередніх поколінь. При цьому втрати при виключенні виявляються на рівні попереднього покоління. У результаті сумарні втрати знижуються.

### Висновок

На сьогоднішній день IGBT і MOSFET широко використовуються в силовій електроніці. На частотах до 30 кГц при великих струмах та напругах очевидна перевага IGBT-транзисторів, якщо потрібна вища частота перемикання розробникам РЕА слід звернути свою увагу на MOSFET-транзистори.

Транзистори IGBT, як клас приладів сигової електроніки, займає домінуюче становище для діапазону потужностей від одиниць до сотень кВт. Причому вибір, яке покоління IGBT використати, залежить від сфери застосування. Подальший розвиток IGBT буде йти шляхом: підвищення діапазону граничних комутованих струмів і напруг; підвищення швидкодії; підвищення стійкості до перевантажень і аварійних режимів; зниження прямого падіння напруги; розробки нових структур з густиною струмів, що наближаються до тиристорних; розвитку "інтелектуальних" IGBT (з вбудованими функціями діагностики та захисту) і модулів на їх основі.

### Література

1. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: профессиональные решения / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. – 416 с.
2. Горященко К.Л. Тенденції розвитку сучасної сигової елементної бази для керування пристроями легкої промисловості / К.Л. Горященко, С.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2004. – № 5. – Ч.1. – С. 174-177
3. Полікарівських О.І. Аналіз сучасних методів побудови силових перетворювачів для електротранспорту / О.І. Полікарівських, В.Є. Гавронський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – №1. – С. 167-170.
4. Дьяконов В. П. и др. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2002. — 512 с.
5. Рогачёв К. Д. Силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [Электронный ресурс] / К. Д. Рогачёв. – Режим доступа: <http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/publ/igbt/transistor.htm>.
6. Алексей Васильев IGBT-модули от International Rectifier: борьба за снижение потерь энергии / Алексей Васильев // Новости электроники. – 2014. – №9. – С. 3-8.
7. Людмила Горева IGBT-транзисторы International Rectifier шестого поколения / Людмила Горева // Силовая Электроника. – 2009. – №4. – С. 27-32.
8. Сверхбыстрые 1200V IGBT 7-го поколения от International Rectifier [Электронный ресурс] /. – Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/brand/irg7.php>

### References

1. Semenov B.Ju. Silovaja jelektronika: professional'nye reshenija / B.Ju. Semenov. – M.: SOLON-PRESS, 2011. – 416 s.
2. Horyashchenko K.L. Tendentsiyi rozvytku suchasnoyi sylovoyi elementnoyi bazy dlya keruvannya prystroyamy lehkoj promyslovosti / K.L. Horyashchenko, S.L. Horyashchenko // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. – 2004. – # 5. – Ch.1. – S. 174-177
3. Polikarovs'kykh O.I. Analiz suchasnykh metodiv pobudovy sylovykh peretvoryuvachiv dlya elektrotransportu / O.I. Polikarovs'kykh, V.Ye. Havrons'ky // Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2010. – #1. – S. 167-170.
4. D'jakonov V. P. i dr. Jenciklopedija ustrojstv na polevykh tranzistorah. — M.: SOLON-PRESS, 2002. — 512 s.
5. Rogachjov K. D. Silovye bipoljarnye tranzistory s izolirovannym zatvorom (IGBT) [Jelektronnyj resurs] / K. D. Rogachjov. – Rezhim dostupa: <http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/publ/igbt/transistor.htm>.
6. Aleksej Vasil'ev IGBT-moduli ot International Rectifier: bor'ba za snizhenie poter' jenerгии / Aleksej Vasil'ev // Novosti jelektroniki. – 2014. – №9. – S. 3-8.
7. Ljudmila Goreva IGBT-tranzistory International Rectifier shestogo pokolenija / Ljudmila Goreva // Silovaja Jelektronika. – 2009. – №4. – S. 27-32.
8. Sverhbystrye 1200V IGBT 7-go pokolenija ot International Rectifier [Jelektronnyj resurs] /. – Rezhim dostupa: <http://www.kosmodrom.com.ua/brand/irg7.php>