

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.382.2/3

В.С. Остренко¹, канд. техн. наук,
Є.В. Кулініч²

1 – Запорізька державна інженерна академія,
м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vso1638@gmail.com
2 – ООО „Полігон-Авто“, м. Запоріжжя, Україна,
e-mail: kulinevgen@yandex.ru

ВИЗНАЧЕННЯ КРАЩОГО ТИПУ IGBT МОДУЛЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ

V.S. Ostrenko¹, Cand. Sci. (Tech.),
Ye.V. Kulnich²

1 – Zaporizhzhia State Engineering Academy, Zaporizhzhia,
Ukraine, e-mail: vso1638@gmail.com
2 – LLC “Polygon-Auto”, Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: kulinevgen@yandex.ru

DETERMINATION OF THE BEST TYPE OF IGBT MODULE FOR APPLICATION IN FREQUENCY CONVERTERS

У сучасних перетворювачах частоти в якості силових ключів застосовуються тільки IGBT модулі, що представляють собою сукупність біполярних транзисторів з ізольованим затвором і діодів зворотного струму. У світі є близько десятка компаній, що виготовляють модулі IGBT за власними технологіями. Розроблення технології виробництва напівпровідникових приладів є дуже складною задачею, бо покращення одних параметрів майже завжди призводить до погіршення інших параметрів. Тому в презентаційних статтях виробники модулів IGBT завжди підкреслюють кращі параметри своїх модулів і замовчують про погіршені параметри.

Мета. Розроблення методики визначення кращого типу модуля IGBT на певну напругу, струм і частоту.

Методика. В основі методики є прийняття того, що кращий модуль повинен мати більшу величину критерію якості, який представляє собою певне співвідношення параметрів IGBT, що впливають на тепловий режим його роботи.

Результати. Структури критеріїв якості визначено шляхом аналізу параметрів двоключових та одноключових модулів, що отримані з довідникових даних на ці прилади. Із цих приладів вибрано 28 модулів IGBT на блокувану напругу від 600 до 6500 В, для яких визначено перший критерій якості. Для уточнення того, який з модулів є кращим при роботі на низькій чи на високій частоті комутації, розроблено ще два критерії.

Наукова новизна. На основі виконаних розрахунків визначено кращі типи модулів IGBT у кожній із 6 груп за напругою у блокуваному стані. Розроблена методика дозволяє вибрати кращий модуль у групі модулів з однаковими споживчими властивостями: блокуваною напругою, номінальним струмом, кількістю силових ключів у модулі.

Практична значимість. Результати досліджень дозволять розробникам перетворювальної техніки застосувати кращі типи модулів IGBT і сприяти подальшому покращенню їх параметрів.

Ключові слова: біполярний транзистор з ізольованим затвором, IGBT, критерій якості, номінальний струм, напруга насичення, енергія комутації, температура напівпровідникової структури

Вступ. Сучасне енергомеханічне обладнання гірничих та гірничозбагачувальних підприємств неможливо створити без застосування регульованих електроприводів змінного струму на основі асинхронного двигуна з живленням від перетворювача частоти. Сучасні перетворювачі частоти виготовляються тільки на основі біполярних транзисторів з ізольованим затвором (InsulatedGateBipolarTransistors, IGBT). Вони є основним приладом силової електроніки для створення силових ключів інверторів, потужних джерел живлення та електроприводів. Модулі IGBT виготовляються на номінальний струм від 10 до 3200 А і

на напругу від 600 до 6500 В. У світі є трохи більше десятка фірм, що спроможні займатися розробкою та виробництвом IGBT. У конкурентній боротьбі між собою ці фірми постійно покращують технології виробництва IGBT з метою покращення їх техніко-економічних показників і завоювання ринку збуту.

Протягом останніх десятиліть зусилля розробників IGBT були постійно спрямовані на зниження напруги у провідному стані, підвищення швидкодії та стійкості перемикання при все зростаючих значеннях струму й блокуючої напруги приладу. Притому, задачі покращення параметрів приладів вирішуються на високому рівні наукоємності.

Розроблення нової технології виробництва напівпровідникових приладів є дуже складною задачею, бо покращення одних параметрів майже завжди призводить до погіршення інших параметрів. Тому розробники новітніх технологій завжди йдуть на певні компроміси, щоб параметри нових приладів найкращим чином задовольняли вимоги споживачів. При цьому кожен виробник модулів IGBT надає споживачам доволі повну інформацію щодо своїх приладів, звертаючи увагу на їх кращі параметри, а розробники перетворювачів частоти не можуть визначити, який виробник виготовляє кращі модулі IGBT на певну напругу, струм і частоту.

У роботах [1–3] еволюція покращення технології створення IGBT визначається значенням FOM (FigureOfMerit) – значенням якості, що визначається за формулою

$$FOM = J_C / (U_{sat} \cdot E_{off}), \quad (1)$$

де J_C – щільність струму через колектор, А / см²; U_{sat} – напруга насичення при $T_j = 125^\circ\text{C}$, В; E_{off} – втрати енергії при вимиканні при $T_j = 125^\circ\text{C}$, мДж/імпульс / А.

Формула (1) добре відображає якість технології створення чипів IGBT. У роботі [3] наочно показано, що значення FOM чипів IGBT (на блокувану напругу 1200 В) п'ятого покоління збільшилося відносно чипів IGBT першого покоління в 10 разів, а шостого покоління – у 13 разів. Слід зауважити, що значення FOM чипів IGBT усіх поколінь вираховуються для температури $T_j = 125^\circ\text{C}$ – максимально допустимого значення температури напівпровідникової структури чипів IGBT першого покоління, у той час як для чипів IGBT п'ятого та шостого поколінь значення цієї температури реально підвищено до 175°C . Крім того, значення FOM не враховує витрати енергії при включенні IGBT та теплових властивостей шляху відведення тепла, що виділяється в чипі. Тому застосування формули (1) до модулів IGBT не дає можливості в достатній мірі зіставити кілька модулів IGBT, щоб визначити, який з них є кращий.

Мета даної роботи – розробка методики визначення комплексних критеріїв, що представляють найкращу сукупність параметрів IGBT, які умовно можна назвати критеріями якості. Ці критерії якості дозволяють визначити тип модуля IGBT, що за своїми електрофізичними параметрами є кращим для проектування кожного конкретного типу перетворювача. Проблема визначення структури критеріїв якості була вирішена шляхом аналізу параметрів 86 типів двоключових та одноключових модулів IGBT, отриманих із мережі Internet (сайтів фірм-виробників модулів IGBT), що розташовані в Європі, Японії та США.

Вирішення проблеми. В основу методики визначення кращого типу модуля IGBT покладено те, що кращий модуль повинен мати більшу величину критерію якості, який представляє собою певне співвідношення параметрів IGBT, що впливають на тепловий режим його роботи. При цьому не враховуються параметри діодів зворотного струму, бо виробники модулів IGBT оптимальним чином підлаштовують параметри діодів під параметри транзисторів.

Порівнювати якість модулів IGBT, що виготовлені різними виробниками, можна тільки в тому випадку, якщо ці модулі мають однакову споживчу властивість. Тому, для початку, необхідно всі досліджувані прилади розділити на окремі групи, в яких модулі мають однакову напругу в блокуваному стані та однаковий номінальний струм.

Сучасні модулі IGBT виготовляються на блокувану напругу від 600 В до 6500 В. У таблиці 1 наведені рекомендовані значення напруги IGBT у блокуваному стані, у залежності від номінального значення напруги ланки постійного струму, з урахуванням запасу щодо космічного опромінювання, для дворівневого інвертора напруги [4].

Таблиця 1

Рекомендовані значення напруги модуля IGBT у залежності від значення напруги ланки постійного струму

Номінальне значення напруги ланки постійного струму, В	Рекомендовані значення напруги модуля U_{CES} , В
345	600
620	1200
900	1700
1800	3300
2800	4500
3600	6000
4000	6500

У відповідності до таблиці 1, усі типи IGBT, що виготовляються, можна поділити на групи і в кожній з них на основі електрофізичних параметрів визначити, який тип IGBT є кращий. Аналізуючи формулу (1) слід зауважити, що споживачі модулів, як правило, не знають площу чипів та їх кількість у модулі, тобто не можуть визначити щільність струму. Тому в цьому випадку значення щільності струму слід замінити на значення номінального струму модуля I_{Cnom} . Крім того, на нагрів напівпровідникової структури впливають не тільки втрати енергії при вимиканні E_{off} , але й втрати енергії при включенні E_{on} , тобто загальна втрата енергії при комутації E_{com} , при максимально допустимій робочій температурі напівпровідникової структури $T_{j(op)max}$, визначається за формулою

$$E_{com} = E_{on} + E_{off},$$

де E_{com} , E_{on} , E_{off} – втрата енергії в IGBT при комутації, включенні та вимиканні, відповідно, при $T_{j(op)max} = 125^\circ\text{C}$ або 150°C , у залежності від типу приладу, мДж.

При цьому критерій якості модуля Cr_q можна записати в такому вигляді

$$Cr_q = I_{Cnom} / (U_{CESat} \cdot E_{com}),$$

де I_{Cnom} – значення номінального струму приладу, А; U_{CESat} – напруга насичення при $T_{j(op)max}$, В.

При вивченні довідникових матеріалів модулів IGBT було виявлено, що такий параметр як номінальний струм, який входить до позначення типу модуля, у підсумку може бути більшим або меншим за величину струму колектора I_C при тестуванні з певним значенням температури основи T_c модуля. Наприклад, модуль фірми Semikron типу SK100GB12T4T, що нормується

як модуль на 100А, витримує при тестуванні тільки 80 А при температурі основи модуля 70°C, або модуль фірми Semikron типу SKM100GB12T4, що має номінальний струм 100 А, витримує при тестуванні 123А при температурі основи модуля 80°C. Для недопущення похибки при визначенні значення критерію якості необхідно ввести корегуючий коефіцієнт.

Корегуючий коефіцієнт приводить умови визначення значення номінального струму до однакового співвідношення між максимально допустимим значенням температури напівпровідникової структури T_{jmax} та температури основи приладу T_c при тестуванні, а також враховує максимальне значення робочої температури напівпровідникової структури IGBT $T_{j(op)max}$, що допускається в більшості режимів роботи модулів і при якій визначається більшість їх параметрів. Більш детально суть цих значень температури наведено в рекомендаціях із застосування IGBT [5].

Корегуючий коефіцієнт K_{cor} необхідно визначати за формулою

$$K_{cor} = \left(\frac{T_{j(op)max}}{125} \right) \cdot \left(\frac{I_c}{I_{cnom}} \right) \cdot \left(\frac{T_c}{T_{jmax}} \right),$$

де $T_{j(op)max} = 125^\circ\text{C}$ або 150°C – максимально допустиме значення робочої температурі напівпровідникової структури, при якій вимірюються параметри модуля при тестуванні, у залежності від типу приладу; I_c – значення струму модуля при тестуванні при температурі основи T_c , А; T_c – температура основи модуля при тестуванні, °C; $T_{jmax} = 125^\circ\text{C}$, або 150°C , або 175°C – значення максимально допустимої температури напівпровідникової структури, у залежності від типу модуля.

Чим більший коефіцієнт корекції, тим більше буде значення критерію якості.

Таким чином, перший критерій якості Cr_{q1} визначається за такою формулою

$$Cr_{q1} = K_{cor} \cdot I_{cnom} / (U_{CESat} \cdot E_{com}).$$

Параметри модулів, що наведені на сайтах їх виробників, приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри модулів IGBT, в яких визначено значення критерію якості Cr_{q1}

U_{CES} , В	$I_{ном}$, А	Фірма	Тип приладу	$T_{jmax} / T_{j(op)max}$, °C	I_c / T_c , А/°C	U_{CESat} , В	E_{com} , мДж	K_{cor}	Cr_{q1} , А/(В·мДж)
600	100	Infineon	BSM100GB60DLC	125/125	100/70	2,2	3,9	0,56	6,53
600	100	Semikron	SKM100GB063D	150/125	100/70	2,4	7	0,467	2,78
600	100	Semikron	SK100GB066T	175/150	75/70	1,65	13	0,36	1,68
1200	100	Powerex	CM100DY-24NF	150/125	100/113	2,0	19,5	0,753	1,93
1200	100	Mitsubishi	CM100DY-24A	150/125	100/84	2,4	14,5	0,56	1,61
1200	100	Infineon	FF100R12RT4	175/150	100/100	2,1	20,5	0,686	1,59
1200	100	Semikron	SKM100GB12V	175/150	121/80	2,2	19,4	0,664	1,55
1200	100	Semikron	SKM100GB12T4	175/150	123/80	2,2	25,2	0,675	1,22
1200	100	Infineon	BSM100GB120DLC	125/125	100/80	2,4	22	0,533	1,0
1200	100	Semikron	SK100GB12T4T	175/150	80/70	2,25	26,6	0,384	0,64
1700	800	Infineon	FF800R17KE3	125/125	800/80	2,4	535	0,533	0,332
1700	800	ABB	5SND800M170100	150/125	800/80	2,6	550	0,533	0,298
1700	800	Fuji	2MBI800U4G-170	150/125	800/80	2,6	570	0,533	0,288
1700	800	Mitsubishi	CM800DZ-34H	150/125	800/80	3,1	610	0,533	0,225
1700	800	Infineon	FF800R17KF6CB2	150/125	800/80	3,1	625	0,533	0,22
1700	800	DYNEX	DIM800DDM1A000	150/125	800/75	3,4	700	0,5	0,168
3300	800	Mitsubishi	CM800HC-66H	150/125	800/100	3,6	2150	0,667	0,069
3300	800	Mitsubishi	CM800HB-66H	150/125	800/100	4,0	2200	0,667	0,0606
3300	800	DYNEX	DIM800NCM33-F000	150/125	800/90	3,6	2950	0,6	0,0452
3300	800	ABB	5SNA0800N330100	150/125	800/80	3,8	2630	0,533	0,0427
3300	800	eupec	FZ(D) 800R33KF2	150/125	800/80	4,3	2940	0,533	0,0337
4500	900	Mitsubishi	CM900HG-90H	150/125	900/100	3,7	6700	0,667	0,024
4500	900	Mitsubishi	CM900HB-90H	125/125	900/85	3,3	6700	0,567	0,023
4500	800	ABB	5SNA0800J450 300	150/125	800/85	3,55	6360	0,567	0,020
6500	600	Infineon	FZ600R65KE3	150/125	600/80	3,7	8600	0,533	0,0100
6500	600	ABB	5SNA0600G650100	125/125	600/85	5,4	8050	0,68	0,0094
6500	600	Mitsubishi	CM600HG-130H	150/125	600/80	4,6	8800	0,533	0,0079
6500	600	eupec	FZ600R65KF1	125/125	600/80	5,3	9400	0,64	0,0077

З аналізу параметрів модулів, які надані в табл. 2, випливає, що величина напруги насичення не завжди адекватно відображає критерій якості, тобто прилад із меншою напругою насичення в групі може мати менший критерій якості, а прилад з більшим значенням напруги насичення в тій самій групі напруги може мати більший критерій якості. Це обумовлено тим, що на величину критерію якості в нерівній мірі

впливає величина напруги насичення в одиницях вольт і втрата енергії при комутації в десятках і сотнях міліджоулів. Внесок цих величин у нагрів напівпровідникової структури є різним. Вплив цих величин на нагрів напівпровідникової структури можливо зіставити лише при порівнянні втрат потужності у провідному стані – P_{cond} та при комутації на певній частоті – P_{com} , наприклад, на частотах 4 і 10 кГц для

приладів на напругу 600–1700 В та на частотах 2 і 4 кГц для приладів на напругу 3300 – 6500 В.

Втрата потужності в IGBT у відкритому стані у дворівневому інверторі напруги, з урахуванням синусоїдальної залежності робочого циклу в часі, визначається за формулою [6]

$$P_{\text{cond}} = 0,5 \left(\frac{U_{\text{CE0}}}{\pi} I_m + \frac{r_{\text{CE}}}{4} I_m^2 \right) + m \cos \varphi \left(\frac{U_{\text{CE0}}}{8} I_m + \frac{r_{\text{CE}}}{3\pi} I_m^2 \right),$$

де P_{cond} – втрата потужності в IGBT у відкритому стані, Вт; $I_m = \sqrt{2} I_{\text{out}}$ – амплітудне значення струму на виході інвертора; можна прийняти $I_{\text{out}} = I_{\text{ном}}$, А; U_{CE0} , r_{CE} – порогова напруга й динамічний опір IGBT у відкритому стані при $U_{\text{GE}} = 15$ В та при температурі $T_{\text{J(оп)max}}$; U_{GE} – напруга на затворі IGBT у провідному стані, В; m – коефіцієнт модуляції, приймаємо $m = 0,9$; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності навантаження інвертора, приймаємо $\cos \varphi = 0,85$; $\pi = 3,14$.

Параметри U_{CE0} , r_{CE} модулів, що досліджувалися, наведені в табл. 3.

Втрата потужності при комутації P_{com} залежить від частоти комутації f_{com} і визначається за формулою

$$P_{\text{com}} = E_{\text{com}} \cdot f_{\text{com}} / \pi,$$

де P_{com} – втрата потужності при комутації IGBT, Вт; f_{com} – частота комутації, Гц.

Для того, щоб оцінити, який з модулів краще використовувати на низькій частоті комутації, а який на високій частоті, були введені ще два критерії: Cr_{q2} – для роботи на частоті $f_1 = 4$ кГц модулів на напругу 600–1700 В та на частоті $f_1 = 2$ кГц для модулів на напругу 3300–6500 В; Cr_{q3} – для роботи на частоті $f_2 = 10$ кГц модулів на напругу 600–1700 В та на частоті $f_2 = 4$ кГц для модулів на напругу 3300–6500 В.

При цьому значення другого та третього критеріїв якості необхідно визначати за формулою

$$Cr_{q2,3} = K_{\text{сн}} \cdot I_{\text{сн}} / (P_{\text{сн}} + P_{\text{сн}1,2}),$$

де Cr_{q2} , Cr_{q3} – критерії якості модулів при роботі на частоті f_1 та f_2 відповідно; $P_{\text{сн}1}$, $P_{\text{сн}2}$ – втрата потужності при комутації на частоті f_1 та f_2 відповідно.

Таблиця 3

Параметри U_{CE0} , r_{CE} модулів

Тип модуля	U_{CE0} , В	r_{CE} , Ом
BSM100GB60DLC	1,03	0,01144
SKM100GB063D	1	0,014
SK100GB066T	0,7	0,0095
CM100DY-24NF	1,16	0,0084
CM100DY-24A	1,2	0,012
FF100R12RT4	0,83	0,0127
SKM100GB12V	0,88	0,0132
SKM100GB12T4	0,7	0,015
FF800R17KE3	0,9	0,001875
5SND800M170100	1,2	0,00175
2MBI800U4G-170	1,5	0,00144
CM800HC-66H	2,1	0,001875
CM800HB-66H	2,7	0,00163
5SNA0800N330100	1,87	0,002415
CM900HG-90H	2,54	0,001286
CM900HB-90H	2,1	0,00133
5SNA0800J450 300	1,75	0,00219
FZ600R65KE3	2,2	0,0025
5SNA0600G650100	3,1	0,00383
CM600HG-130H	3,6	0,00233

У табл. 4 наведені значення критеріїв якості для кращих модулів за критерієм якості Cr_{q1} , що потребують уточнення їх якості за критеріями Cr_{q2} , Cr_{q3} .

Таблиця 4

Значення критеріїв якості кращих модулів IGBT

Тип модуля	Cr_{q1} , А/(В·мДж)	P_{cond} , Вт	$P_{\text{com}1}$, Вт, f_1	$P_{\text{com}2}$, Вт, f_2	Cr_{q2} , А/Вт	Cr_{q3} , А/Вт
Модулі 600 В – 100 А						
BSM100GB60DLC	6,53	80,7	4,97	12,4	0,545	0,502
SKM100GB063D	2,78	89,7	8,92	22,3	0,474	0,417
SK100GB066T	1,68	61,64	16,56	41,4	0,461	0,349
Модулі 1200 В – 100 А						
CM100DY-24NF	1,93	73,2	24,83	62,1	0,763	0,557
CM100DY-24A	1,61	88,77	18,47	46,18	0,522	0,415
FF100R12RT4	1,59	78,75	26,1	65,3	0,654	0,476
SKM100GB12V	1,55	82,4	24,7	61,8	0,624	0,46
SKM100GB12T4	1,22	83,3	32,1	80,3	0,585	0,413
Модулі 1700 В – 800 А						
FF800R17KE3	0,332	717,9	681,5	1703,2	0,305	0,176
5SND800M170100	0,298	1160	700,6	1751,6	0,229	0,146
2MBI800U4G-170	0,288	1081,9	726,1	1815,3	0,236	0,147
Модулі 3300 В – 800 А						
CM800HC-66H	0,069	1053,5	1369,4	2738,9	0,22	0,141
CM800HB-66H	0,0606	1157,5	1401,3	2802,5	0,2085	0,1347
5SNA0800N330100	0,0427	1126,3	1675,2	3350,3	0,1522	0,0953
Модулі 4500 В 800 – 900 А						
CM900HG-90H	0,024	1200,4	4267,5	8535	0,1023	0,0617
CM900HB-90H	0,023	1077,7	4267,5	8535	0,0955	0,0531
5SNA0800J450 300	0,020	1036,3	4051	8102	0,0892	0,0496
Модулі 6500 В – 600 А						
FZ600R65KE3	0,0100	810,9	5477,7	10955,4	0,0509	0,0272
5SNA0600G650100	0,0094	1186,2	5127,4	10254,8	0,0646	0,0357
CM600HG-130H	0,0079	1076,8	5605	11210	0,0478	0,026

Аналізуючи значення критеріїв якості Cr_{q1} , Cr_{q2} , Cr_{q3} , що наведені в табл. 4, можна відмітити, що майже всі кращі модулі, згідно з критерієм Cr_{q1} , зберегли свою перевагу, згідно з критеріями якості Cr_{q2} , Cr_{q3} , тобто, ті модулі, в яких значення Cr_{q1} є найбільшим у своїй групі, і по критеріям Cr_{q2} , Cr_{q3} мають найбільші значення. Винятком із цієї тенденції є два модуля: FZ600R65KE3 та 5SNA0600G650100.

Значення критерію Cr_{q1} модуля FZ600R65KE3 складає 0,01 А/(В·мДж), у той час як модуля 5SNA0600G650100 – 0,0094 А/(В·мДж), тобто на 6,4% менше ($[(0,01 - 0,0094)/0,0094] \cdot 100\% \approx 6,4\%$). Аналогічним чином визначається, що у модуля 5SNA0600G650100 значення критерію Cr_{q2} на 26,9% більше, ніж у модуля FZ600R65KE3, а по значенню критерію Cr_{q3} перевага модуля 5SNA0600G650100 ще більше зростає – до 31%. Таким чином, за своїми параметрами модуль 5SNA0600G650100 є кращим, ніж модуль FZ600R65KE3.

Слід зауважити, що на основі визначених критеріїв якості не можна робити остаточний висновок щодо того, яка фірма виготовляє кращі модулі IGBT. Кожний рік з'являються нові модулі з ще кращими параметрами, з більш великими значеннями критеріїв якості.

Висновки.

1. Розроблена методика визначення критеріїв якості модулів IGBT на основі параметрів, що надаються в довідникових матеріалах на них, дозволяє вибрати для застосування модуль IGBT із кращім співвідношенням електрофізичних параметрів.

2. Найбільш простим у визначенні і, разом з цим, найбільш ефективним є критерій якості модулів IGBT Cr_{q1} .

3. Тільки у випадках, коли кращій модуль за критерієм якості Cr_{q1} не перевищує на 10% інших у своїй групі за напругою та струмом, є сенс визначати значення критеріїв якості Cr_{q2} , Cr_{q3} при роботі на певній частоті та на основі зіставлення значень цих трьох критеріїв визначати кращій модуль IGBT.

Список літератури / References

1. Taketo Nishiyama and Yuji Miyazaki (2009), "TheIGBTModulewith 6th Generation IGBT", Mitsubishi Electric Corporation, Japan, available at: http://www.elektron.ch/fileadmin/ProductData/Leistungselektronik/Leistungshalbleiter/Neuheiten/Paper_The_IGBTModule_with_6th_Gen_IGBT_end.pdf
2. Текето Нисияма. Модули Mitsubishi Electric на базі 6-го покоління IGBT [Електронний ресурс] / Текето Нисияма, Юджи Миязаки // Силовая Электроника. – 2010. – №3. – С. 16–18 – Режим доступу: http://www.power-e.ru/pdf/2010_3_16.pdf, вільний, – Загол. з екрану.
3. Taketo Nishiyama, Yuji Miyazaki (2010), "The 6th-GenerationIGBT Modules MitsubishiElectric", *journal Power Electronics*, no.3, pp. 16–18.
3. Tetsuo Takahashi, Yusuihiro Yoshiura "The 6th-GenerationIGBT& Thin Wafer Diodefor New Power Modules", Power Device, Mitsubishi Electric

ADVANCE, June 2011, p. 5–7 available at: http://www.mitsubishielectric.com/company/rd/advance/pdf/vol135/135_TR3.pdf

4. Bjorn Backlund, Eric Carroll (2006), "Voltage ratings of high power semiconductors", ABB Semiconductors, Switzerland, available at: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/1c4234b4fa1cb5f4c12571e7004bed25/\\$file/5SYA%202051-00%20August%2006%20Voltage%20ratings%20of%20high%20power%20semiconductors.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/1c4234b4fa1cb5f4c12571e7004bed25/$file/5SYA%202051-00%20August%2006%20Voltage%20ratings%20of%20high%20power%20semiconductors.pdf)

5. Raffael Schnell, Martin Bayer, Silvan Geissmann (2011), "Thermal Design and Temperature Ratings of IGBT Modules", ABB, Switzerland, available at: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/754216faaa21d0e6c125791f0046de68/\\$file/5SYA%202093-00_thermal%20desi](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/754216faaa21d0e6c125791f0046de68/$file/5SYA%202093-00_thermal%20desi)

6. Bjorn Backlund, Raffael Schnell, Ulrich Schlapbach, Roland Fischer, Evgeny Tsyplakov (2009), "Applying IGBT", ABB Semiconductors, Switzerland, available at: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/2f1b6e7c0b7832ebc12575ae002691b6/\\$file/5sya2053-03%20applying%20igbts.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/2f1b6e7c0b7832ebc12575ae002691b6/$file/5sya2053-03%20applying%20igbts.pdf)

В современных преобразователях частоты в качестве силовых ключей применяются только IGBT модули, представляющие собой совокупность биполярных транзисторов с изолированным затвором и диодов обратного тока. В мире есть около десятка компаний, производящих модули IGBT по собственным технологиям. Разработка технологии производства полупроводниковых приборов является очень сложной задачей, поскольку улучшение одних параметров почти всегда приводит к ухудшению других параметров. Поэтому в презентационных статьях производители модулей IGBT всегда подчеркивают лучшие параметры своих модулей и умалчивают об ухудшенных параметрах.

Цель. Разработка методики определения лучшего типа модуля IGBT на определенное напряжение, ток и частоту.

Методика. Основой методики является принятие того, что лучший модуль должен иметь большую величину критерия качества, который представляет собой определенное соотношение параметров IGBT, влияющих на тепловой режим его работы.

Результаты. Структуры критериев качества определены путем анализа параметров двуключевых и одноключевых модулей, полученные из справочных данных на эти приборы. Из этих приборов выбрано 28 модулей IGBT на блокирующее напряжение от 600 до 6500 В, для которых определен первый критерий качества. Для уточнения того, какой из модулей является лучшим при работе на низкой или на высокой частоте коммутации, разработаны еще два критерия.

Научная новизна. На основе выполненных расчетов определены лучшие типы модулей IGBT в каждой из 6 групп по напряжению в заблокированном состоянии. Разработанная методика позволяет выбрать лучший модуль в группе модулей с одинаковыми потребительскими свойствами: блокирующим

напряжением, номинальным током, количеством силовых ключей в модуле.

Практическая значимость. Результаты исследований позволят разработчикам преобразовательной техники применять лучшие типы модулей IGBT и способствовать дальнейшему улучшению их параметров.

Ключевые слова: *биполярный транзистор с изолированным затвором, IGBT, критерий качества, номинальный ток, напряжение насыщения, энергия коммутации, температура полупроводниковой структуры*

In the capacity of power keys in modern frequency converters are used only IGBT modules which correspond to a combination of bipolar transistor with insulated gate and reverse current diode. The world has about a dozen companies that produce IGBT modules under their own technology. Development of production technology of semiconductor devices is a difficult task because improvement of some parameters almost always results in deterioration of other parameters. Therefore, during new product presentation the manufacturers of IGBT always emphasize the best parameters of modules and withhold information about the worsened parameters. Thus, frequency converters designer cannot identify which manufacturer produces the best IGBT modules for a certain voltage, current and frequency.

Purpose. To develop methods of determination of the best type IGBT module for certain voltage, current and frequency.

Methodology. At the basis of the methodology we have laid the statement that the best module should have the highest value of the quality criterion, which corresponds to definite correlation of IGBT parameters affecting the thermal regime of its work.

Findings. The structure of the criteria was determined by analyzing the parameters of two-keys and one-key modules received from data sheets for these devices. Between these devices 28 IGBT modules with blocked voltage from 600 to 6500 V have been selected, and the first quality criterion has been defined for them. Two additional criteria have been developed to determine which modules better meet the requirements of work at low or high switching frequency.

Originality. As a result of calculations we have determined the best types of IGBT modules in each of 6 groups of voltage in the blocked state. The method allows us to select the best module in the group of modules with the same consumer characteristics: blocked voltage, rated current, the number of power keys in the module.

Practical value. This will allow developers of converters to use the best types of IGBT modules and facilitate further improvement of their parameters.

Keywords: *insulated gate bipolar transistors, IGBT, quality criteria, rated current, saturation voltage, switching energy, junction temperature*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
Т.В. Бабенко. Дата знаходження рукопису 13.03.12.*