

ОЦІНКА ЧАСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ IGBT4 МОДУЛІВ В РЕЖИМІ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Запропонована методика виконання розрахунків визначення режимів роботи IGBT модулів дворівневого інвертора напруги. Запропоновані формули розрахунків для визначення максимальної та мінімальної температури IGBT чіпів при циклічному навантаженні. На основі експериментальних досліджень фірми SEMIKRON розроблена формула визначення кількості циклів до відмови IGBT4 модулів в залежності від перепаду температури та середньої температури в циклі.

Ключові слова: IGBT модуль, час експлуатації та температура IGBT, циклічне навантаження, кількість циклів.

ВСТУП

Характерним для циклічного навантаження силових напівпровідникових приладів є те, що при цьому температура внутрішніх деталей приладу коливається в певних межах. У зв'язку з тим, що ці внутрішні деталі зроблені з різних матеріалів, вони мають, відповідно, різні значення коефіцієнтів температурного розширення. Тому при зміні температури контактні області з'єднання цих різномірних деталей знаходяться під впливом термомеханічних напружень, які після певної кількості циклів приводять до деградації електричних та теплових параметрів модуля з послідовним його пошкодженням.

Фірма SEMIKRON провела дослідження по визначенню кількості циклів до відмови N_f IGBT модулів, які зроблені за технологією Trench 4. Результати цих досліджень наведені на рис 1 [1].

При проведенні досліджень виявлено, що циклоустійкість модулів залежить не тільки від значення перепаду температури IGBT чіпа ΔT_j , а і від значення середньої температури IGBT чіпа протягом циклу T_{jm} , які визначаються за формулами:

$$\Delta T_j = T_{j\max} - T_{j\min}; \quad (1)$$

$$T_{jm} = (T_{j\max} + T_{j\min}) / 2, \quad (2)$$

де $T_{j\max}$, $T_{j\min}$ – максимальне та мінімальне значення температури IGBT чіпа під час циклічного навантаження, відповідно.

Використання результатів експериментальних досліджень фірми SEMIKRON для оцінки часу експлуатації модулів IGBT4 потребує знання алгоритму визначення

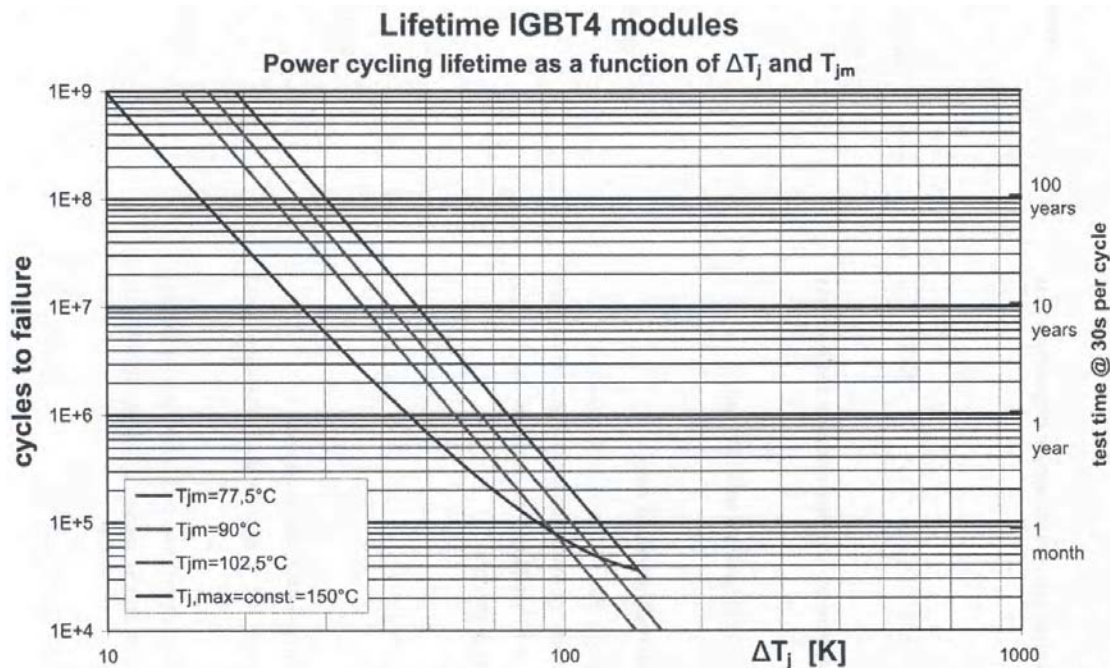


Рисунок 1 – Кількості циклів до відмови IGBT4 модулів в залежності від перепаду температури ΔT_j та середньої температури T_{jm} в циклі

значень ΔT_j та T_{jm} , які мають складну залежність від багатьох параметрів модулів та режимів їх експлуатації. Отримання формул, що зв'язують час експлуатації IGBT модулів з їх параметрами та параметрами системи охолодження є метою цієї статті.

ФОРМУЛИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РЕЖИМ РОБОТИ IGBT МОДУЛЯ

Значення T_{jmax} визначається за формулою, що аналогічна формулі для тиристорів, яка наведена у [2]:

$$T_{jmax} = P_T \cdot \left[\frac{t_p}{t_c} \cdot R_{th(j)sT} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{th(j)sT}(t_p + t_c) - Z_{th(j)sT}(t_c) + Z_{th(j)sT}(t_p) \right] + k \cdot (P_T + P_D) \cdot \left[\frac{t_p}{t_c} \cdot R_{thsa} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{thsa}(t_p + t_c) - Z_{thsa}(t_c) + Z_{thsa}(t_p) \right] + T_{amb}, \quad (3)$$

де P_T – втрати потужності у IGBT чіпі; t_p та t_c – тривалість часу навантаження в циклі та тривалість циклу, відповідно; $R_{th(j)sT}$ – тепловий опір IGBT чіп-контактна поверхня охолоджувача; $Z_{th(j)sT}(t_p + t_c)$, $Z_{th(j)sT}(t_c)$, $Z_{th(j)sT}(t_p)$ – значення перехідного теплового опору IGBT чіп-контактна поверхня охолоджувача для моментів часу $(t_p + t_c)$, (t_c) , (t_p) , відповідно, які визначаються за формулою:

$$Z_{th(j)sT}(t) = \sum_{i=1}^n R_i \cdot (1 - e^{-t/\tau_i}), \quad (4)$$

де t – момент часу, для якого визначається перехідний тепловий опір; R_i, τ_i – параметри перехідного теплового опору, що наведені у довідникових даних IGBT; k – кількість силових ключів в модулі, P_D – втрати потужності в чіпі діоду зворотного струму; R_{thsa} – тепловий опір охолоджувача; $Z_{thsa}(t_p + t_c)$, $Z_{thsa}(t_c)$, $Z_{thsa}(t_p)$ – значення перехідного теплового опору охолоджувача для моментів часу $(t_p + t_c)$, (t_c) , (t_p) , відповідно, які визначаються за формулою (4) з використанням параметрів перехідного теплового опору охолоджувача, що визначаються за алгоритмом та програмою наведеними у [3], [4]; T_{amb} – температура охолоджуючого середовища.

Примітка. Значення T_{jmax} не повинне перевищувати значення максимально допустимої температури в тривалому режимі роботи для чіпів IGBT, що створені за технологією Trench 4, яке дорівнює $T_{j(op)} = 150^\circ\text{C}$.

Значення T_{jmin} визначається за формулою, що аналогічна формулі для тиристорів, яка наведена у [5]:

$$T_{jmin} = P_T \cdot \left[\frac{t_p}{t_c} \cdot R_{th(j)sT} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{th(j)sT}(t_c) - Z_{th(j)sT}(t_c - t_p) \right] + k \cdot (P_T + P_D) \cdot \left[\frac{t_p}{t_c} \cdot R_{thsa} + \left(1 - \frac{t_p}{t_c}\right) \cdot Z_{thsa}(t_c) - Z_{thsa}(t_c - t_p) \right] + T_{amb}, \quad (5)$$

де $Z_{th(j)sT}(t_c - t_p)$ – значення перехідного теплового опору IGBT чіп-контактна поверхня охолоджувача для моменту часу $(t_c - t_p)$; $Z_{thsa}(t_c - t_p)$ – значення перехідного теплового опору охолоджувача для моменту часу $(t_c - t_p)$.

Втрати потужності в IGBT чіпі визначається за формулою:

$$P_T = P_{condT} + P_{sw}, \quad (6)$$

де P_{condT} – втрати потужності в IGBT у провідному стані; P_{sw} – втрати потужності в IGBT при комутації струму.

Втрати потужності в IGBT у провідному стані при роботі у складі дворівневого інвертора напруги, з урахуванням синусоїдальної залежності робочого циклу у часі в режимі ШІМ, визначаються за формулою [6]:

$$P_{condT} = 0,5 \cdot \left(\frac{U_{CE0}}{\pi} \cdot I_m + \frac{r_{CE}}{4} \cdot I_m^2 \right) + m \cdot \cos \varphi \cdot \left(\frac{U_{CE0}}{8} \cdot I_m + \frac{r_{CE}}{3 \cdot \pi} \cdot I_m^2 \right), \quad (7)$$

де U_{CE0} , r_{CE} – порогова напруга та динамічний опір транзистора, відповідно, при максимально допустимому значенні робочої температури чіпа $T_{j(op)}$; I_m – амплітудне значення струму на виході інвертора;

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_{out}, \quad (8)$$

де I_{out} – діюче значення струму навантаження інвертора; m – коефіцієнт модуляції; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності навантаження інвертора (електродвигуна).

Втрати потужності в діоді зворотного струму у провідному стані визначаються за формулою [6]:

$$P_{condD} = 0,5 \cdot \left(\frac{U_{F0}}{\pi} \cdot I_m + \frac{r_F}{4} \cdot I_m^2 \right) - m \cdot \cos \varphi \cdot \left(\frac{U_{F0}}{8} \cdot I_m + \frac{r_F}{3 \cdot \pi} \cdot I_m^2 \right), \quad (9)$$

де U_{F0} , r_F – порогова напруга та динамічний опір діоду зворотного струму, відповідно, при максимально допу-

стимому значенні робочої температури напівпровідникової структури $T_{j(\text{op})}$.

Сумарні втрати потужності в транзисторі та діоді у провідному стані визначаються за формулою:

$$P_{\text{cond}} = (P_{\text{cond T}} + P_{\text{cond D}}). \quad (10)$$

Для IGBT модуля без металевої основи втрати потужності при максимальному значенні частоти комутації $f_{\text{sw max}}$ визначаються за формулою [7]:

$$P_{\text{sw max}} = \frac{T_{j(\text{op})} T_{\text{amb}} - P_{\text{cond T}} \cdot R_{\text{th (js)T}} - k \cdot P_{\text{cond}} \cdot R_{\text{th sa}}}{R_{\text{th (js)T}} + k \cdot [1 + (E_{\text{rr m}} / E_{\text{sw m}})] \cdot R_{\text{th sa}}}, \quad (11)$$

де $E_{\text{rr m}}$ – втрати енергії при відновлюванні замикаючої спроможності діоду зворотного струму та $E_{\text{sw m}}$ – втрати енергії при комутації транзистора, які визначаються за формулами [6]:

$$E_{\text{rr m}} = \left(\frac{d}{2} + \frac{e}{\pi} \cdot I_m + \frac{f}{4} \cdot I_m^2 \right) \cdot U_{\text{dc}} / U_{\text{nom}}, \quad (12)$$

$$E_{\text{sw m}} = \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{\pi} \cdot I_m + \frac{c}{4} \cdot I_m^2 \right) \cdot U_{\text{dc}} / U_{\text{nom}}, \quad (13)$$

де a, b, c, d, e, f – коефіцієнти поліномів, що апроксимують залежність втрат енергії при комутації транзистора та при відновленні замикаючої спроможності діоду від значення струму, які визначаються за методом, який застосовано в роботі [8]; U_{nom} – значення напруги, при якій визначаються динамічні параметри модуля; U_{dc} – напруга ланки постійного струму інвертора, яка визначається за формулою:

$$U_{\text{dc}} = \frac{2\sqrt{2}}{m \cdot \sqrt{3}} \cdot U_{\text{out}}, \quad (14)$$

де U_{out} – значення напруги на виході інвертора.

Максимальне значення частоти комутації IGBT визначається за формулою:

$$f_{\text{sw max}} = P_{\text{sw max}} / E_{\text{sw m}}, \quad (15)$$

Втрати потужності в діоді зворотного струму при відновленні замикаючої спроможності P_{rr} визначаються за формулою:

$$P_{\text{rr}} = f_{\text{sw}} \cdot E_{\text{rr m}}. \quad (16)$$

Загальні втрати потужності в діоді зворотного струму при тривалому режимі роботи визначаються за формулою:

$$P_{\text{D}} = P_{\text{cond D}} + P_{\text{rr}}. \quad (17)$$

Таким чином визначаються усі параметри, що характеризують режим циклічного навантаження IGBT модуля і за допомогою діаграм, що зображені на рис. 1, можна оцінити час експлуатації в певному режимі циклічного навантаження.

ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКІВ

В процесі проектування інверторів, в яких застосовуються IGBT модулі, користування графічними залежностями є не зручним. Тому три верхніх діаграми рис. 1 були апроксимовані наступною формулою:

$$N_f = \exp((\ln A_0 - k \cdot T_{j\text{m}}) - B \cdot \ln \Delta T_j) = \exp((39,82 - 0,055 \cdot T_{j\text{m}}) - 5,055 \cdot \ln \Delta T_j), \quad (18)$$

де N_f – кількість циклів навантаження IGBT4 модуля до відмови.

Час експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження t_w визначається за формулою:

$$t_{w1} = t_c \cdot N_f / 3600 \text{ (годин)}, \quad (19)$$

або при річному ресурсі роботи 7000 годин (без урахування часу простою, профілактики та ремонту) за формулою:

$$t_{w2} = t_c \cdot N_f / 252 \cdot 10^5 \text{ (років)} \quad (20)$$

В таблиці 1 наведені результати розрахунків, які свідчать про адекватність формули (18) до діаграм рис. 1 та деякі переваги при застосуванні цієї формули при проектуванні інверторів. Точність розрахунків кількості циклів до відмови визначалась за формулою:

$$\delta = \frac{(N_{f \text{ cal}} - N_{f d})}{N_{f d}} \cdot 100\%, \quad (21)$$

де $N_{f \text{ cal}}$ – кількість циклів за формулою (18); $N_{f d}$ – кількість циклів за діаграмами рис. 1.

Оцінка часу експлуатації модулів визначалась при умові тривалості циклу 30 с.

Аналіз результатів розрахунків, що наведені в таблиці 1, свідчить:

1. Формула (18) визначення кількості циклів до відмови з точністю до 4% адекватно відповідає діаграмам, що стосуються модулів IGBT4.

2. Використовування формули (18) дозволяє визначати значення N_f при будь-яких значеннях $T_{j\text{m}}$ в межах діапазону температури від $(T_{\text{amb}} + \Delta T_j / 2)$ до $(T_{j(\text{op})} - \Delta T_j / 2)$.

3. Розроблений метод виконання розрахунків може бути застосовано для визначення режимів роботи IGBT модулів та для оцінки часу їх експлуатації в складі індустриальних приводів змінного струму, приводів електромобілів та вітроенергетичних установок.

4. Перепад температури IGBT чіпа ΔT_j більш 50°C значно скорочує термін експлуатації модулів до недопустимого рівня (менше 2 років при тривалості циклу 30 с.).

5. Середня температура IGBT чіпа протягом циклу $T_{j\text{rr}}$ та максимальне значення температури IGBT чіпа $T_{j\text{max}}$ суттєво впливають на термін експлуатації модулів.

6. Застосування IGBT4 модулів в комплекті з рідинними охолоджувачами, при яких мінімальна температура в циклі $T_{j\text{min}}$ не перевищує 50°C значно підвищує термін їх експлуатації.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

$T_{j\text{np}}$, °C	ΔT_j , °C	$T_{j\text{max}}$, °C	$T_{j\text{min}}$, °C	$N_{f\text{cal}}$, циклів	$N_{f\text{d}}$, циклів	δ , %	t_{w2} , років
77,5	30	92,5	62,5	101 186 022	1E+8	1,2	119
77,5	50	102,5	52,5	77 288	8E+6	- 3,4	9,5
77,5	60	107,5	47,5	3 086 274	3E+6	2,9	3,5
77,5	80	117,5	37,5	725 049	7E+5	3,6	0,8
77,5	90	122,5	32,5	400 696	4E+5	0,2	0,47
90	20	100	80	391 888 533	4E+8	- 2	476
90	30	105	75	50 879 527	5E+7	1,8	59
90	70	125	55	714 134	7E+5	2	0,8
90	90	135	45	201 482	2E+5	0,8	0,24
102,5	20	112,5	92,5	197 033 929	2E+8	- 1,5	238
102,5	40	122,5	82,5	6 010 340	6E+6	0,2	7
102,5	50	127,5	77,5	1 954 146	2E+6	- 2,3	2,3
102,5	90	147,5	57,5	101 312	1E+5	1,3	0,12
105	30	120	90	22 297 189			26,5
100	40	120	80	6 896275			8,1
95	50	120	70	2 951 913			3,5
90	60	120	60	1 551 876			1,8
115	30	130	100	12 864 359			15,3
110	40	130	90	3 978 804			4,7
105	50	130	80	1 703 106			2
130	20	140	120	43 422 487			51
125	30	140	110	7 422 089			8,8
120	40	140	100	2 295 570			2,7
115	50	140	90	982 606			1,1
135	30	150	120	4 282 173			4,7
130	40	150	110	1 324 428			1,5
50	30	65	35	459 188 419			546
50	40	70	30	107 875 889			127
60	40	80	40	62 238 973			73
60	50	85	35	20 235 806			24
60	60	90	30	8 080 587			9,6
70	40	90	50	35 968 764			42
70	50	95	45	11 675 044			13
70	60	100	40	4 662 093			5,5

ВИСНОВКИ

1. Розроблена методика виконання розрахунків для визначення циклічних режимів роботи IGBT модулів у складі дворівневих інверторів напруги, що дозволило оцінити їх час експлуатації при будь яких температурах та при застосуванні будь якого охолоджувача.

2. Розроблені формули для визначення максимальної та мінімальної температури IGBT чіпів при циклічному навантаженні струмом.

3. На основі результатів експериментальних досліджень спеціалістів фірми SEMIKRON, розроблена формула визначення кількості циклів до відмови IGBT4 модулів в залежності від перепаду температури та середньої температури в циклі. екрану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Application Manual Power Semiconductors [Електронний ресурс] = Підручник до застосування силових

напівпровідникових приладів / Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann/SEMIKRON International GmbH [2011] – Режим доступу: http://www.semikron.com/download/assets/pdf/application_handbook/application_manual_complete.pdf вільний, – Загол. з екрану.

2. Джентри Ф., Гутцвиллер Ф., Голоньяк Р., Э. фон Застров. Управляемые полупроводниковые вентили. Из-во «Мир», М. : –1967.– 456 с.

3. Остренко В. С. Алгоритм визначення параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача. Науковий журнал «Радіоелектроніка Інформатика Управління», 1(24) 2011, С. 23–29.

4. Остренко В. С., Егунова Е. С. Определение параметров эконент аппроксимирующих кривую переходного теплового сопротивления. «Технічна електродинаміка», тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність», –2012. Ч. 2, – С. 147–150.

5. Остренко В. С. Василенко О. В. Определение температуры полупроводниковой структуры тиристора при циклической нагрузке. *Научный журнал «Электротехника та електроенергетика»*, №1, –2012., С. 13–16.
6. Applying IGBT Application Note 5SYA 2053-04 [Электронный ресурс] = Застосування IGBT / Bjorn Backlund, Raffael Schnell, Ulrich Schlapbach, Roland Fischer, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors – Електронні данні (1 файл). – Switzerland [2012] – Режим доступу: [http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/\\$file/Applying%20IGBTs_5SYA%202053-04.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/$file/Applying%20IGBTs_5SYA%202053-04.pdf) вільний, – Загол. з екрану.
7. Остренко В. С. Определение максимально допустимого значения частоты коммутации модуля IGBT. *Научный журнал «Электротехника та електроенергетика»*, №2, –2012, С. 28–33.
8. Остренко В. С., Критська Т. В. Визначення температури IGBT модуля при пуску асинхронного двигуна. *Научный журнал «Электротехника та електроенергетика»*, №2, –2013, С. 47–53.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2015

Після доробки 25.05.2015

Остренко В. С.

Канд. техн. наук, доцент, Запорожская государственная инженерная академия, Украина

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИИ IGBT4 МОДУЛЕЙ В РЕЖИМЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Предложена методика выполнения расчётов для определения режимов работы IGBT модулей двухуровневого инвертора напряжения. Предложены формулы расчетов для определения максимальной и минимальной температуры IGBT чипов при циклической нагрузке. На основе экспериментальных исследований фирмы SEMIKRON разработана формула определения количества циклов до отказа IGBT4 модулей в зависимости от перепада температуры и средней температуры IGBT чипов в цикле.

Ключевые слова: IGBT модуль, SKiiP4, циклическая нагрузка, количество циклов

Ostrenko V. S.

Ph.D., Associate Professor, Zaporizhia State Engineering Academy, Ukraine

TIME EVALUATION OF THE EXPLOITATION OF IGBT4 MODULES UNDER CYCLIC LOAD MODE

The method of calculation to determine the mode of IGBT module operation for the two-level voltage inverter is proposed. IGBT module does not have a metal base plate in the calculation assumed. The intensity of the cooling module takes into account the thermal impedance of the heat sink.

The maximum permissible switching frequency of IGBT at limited ambient temperature, thermal resistance of the heat sink, load current of the inverter and the maximum permissible IGBT chip temperature are given.

Calculation formulae for determination of the maximum and minimum IGBT chips temperatures under cyclic loading are proposed for use.

On the basis of experimental research done by SEMIKRON firm the formulae for determination of the number of cycles to failure IGBT4 modules, which are dependent on the temperature differences and the mean temperature of the IGBT chip in cycle, are proposed.

Keywords: IGBT module, SKiiP4, cyclic loading, power cycling, number of cycles

REFERENCES

1. Application Manual Power Semiconductors [Electronic resource] Manual/ Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann/SEMIKRON International GmbH [2011] – access mode: http://www.semikron.com/download/assets/pdf/application_handbook/application_manual_complete.pdf (free). – Title Screen.
2. Gentry F. E., Gutzwiller F. W., Holonyak N., jr, E. E. von Zastrow Semiconductor Controlled Rectifiers/Prentice-Hall, Inc. N. J. 1964.
3. Ostrenko V. S. Algoritm vyznachennia parametriv eksponent, shcho aproksymuiut perekhidnyi teplovyi opyr okholodzhuvacha. *Radioelektronika, Informatyka, Upravlinnia*, 1(24)'2011, pp. 23–29.
4. Ostrenko V. S., Egunova E. S. Opredelenie parametrov eksponent approksimiruyushchikh krivuyu perekhodnogo teplovogo soprotivleniya. «*Tekhnichna elektrodynamika*», tematychny vypusk «*Sylovaia elektronika ta energoefektyvnist*», 2012 r. CHastyna 2, pp. 147–150.
5. Ostrenko V. S., Vasilenko O. V. Opredelenie temperatury poluprovodnikovoy struktury tiristora pri tsiklicheskoj nagruzke. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, 1'2012 pp. 13–16.
6. Applying IGBT Application Note 5SYA 2053-04 [Electronic resource] / Bjorn Backlund, Raffael Schnell, Ulrich Schlapbach, Roland Fischer, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors – Elektronni dannii (1 file). – Switzerland [2012] – access mode: [http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/\\$file/Applying%20IGBTs_5SYA%202053-04.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/ab119704d4797bc283257cd3002ac5e0/$file/Applying%20IGBTs_5SYA%202053-04.pdf) (free), – Title Screen.
7. Ostrenko V. S. Opredelenie maksimalno dopusmogogo znacheniya chastoty kommutatsii modul'ia IGBT. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, 2'2012 pp. 28–33.
8. Ostrenko V. S., Kritska T. V. Vyznachennya temperatury IGBT modul'ia pry pusku asynkhronogo dvyguna. *Elektrotekhnika ta elektroenergetika*, 2'2013 pp. 47–53.