

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ IGBT МОДУЛЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ ПРИ ПУСКУ АСИНХРОНОГО ДВИГУНА

*Запропонована методика виконання розрахунків для визначення типу IGBT модуля, значення температури структур транзисторів та діодів зворотного струму у перетворювачі частоти електропривода змінного струму при пуску двигуна в залежності від статичного моменту та моменту інерції виконуючого механізму. Наведені діаграми залежності температури структур транзисторів та діодів зворотного струму від тривалості розгону і моменту інерції системи асинхронний двигун – виконуючий механізм.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, IGBT модуль, температура структури, момент інерції.

### ВСТУП

Найбільш ефективним та економічним способом плавного пуску та регулювання швидкості обертання ротора асинхронних двигунів є зміна частоти  $f$  напруги живлення. При цьому слід брати до уваги, що для найкращого використання двигуна зміна частоти повинна супроводжуватися зміною амплітуди напруги живлення  $U$ . Для реалізації номінального моменту у всьому діапазоні швидкості обертання ротора необхідно, щоб асинхронний двигун працював при номінальному значенні магнітного потоку  $\Phi_{\text{мн}}$ . Але при пуску двигуна необхідно забезпечити не тільки номінальний статичний момент виконуючого механізму, а і подолати динамічний момент інерції. При цьому, величина цього динамічного моменту інерції залежить від часу прискорення частоти обертання ротору двигуна. Для подолання динамічного моменту на час розгону двигуна обмотки статора створюють додаткове магнітне поле за рахунок підвищення струму споживання. За звичаєм, бажано, щоб тривалість розгону двигуна була мінімальна, тобто, щоб прискорення було максимальним. Це може привести до надмірного збільшення струму на виході перетворювача частоти і вивести з ладу біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT), що використовуються в якості силових ключів.

Щоб запобігти пошкодженню напівпровідникових приладів, або не обґрунтованому спрацьовуванню системи захисту, розробники електроприводів змінного струму повинні передбачати необхідні запаси IGBT та діодів зворотного струму відносно режимів роботи і визначити мінімально допустиму тривалість розгону двигуна при певних параметрах виконавчого механізму. За звичаєм, для захисту IGBT модулів при пуску асинхронних двигунів застосовують обмеження струму навантаження перетворювача частоти, не зважаючи на параметри виконуючого механізму і системи охолодження, тобто не роблячи розрахунків перехідних теплових режимів. Питанням виконання розрахунків для вирішення проблеми визначення режиму роботи IGBT модулів при пуску асин-

хронного двигуна присвячена ця стаття. Вивчення англomовних, російськомовних українськомовних джерел інформації за цієї проблеми показало, що такі розрахунки робляться вперше.

### РЕЖИМ НАВАНТАЖЕННЯ IGBT МОДУЛЯ

Майже усі параметри напівпровідникових приладів мають значну температурну залежність, тому в процесі проектування перетворювачів їх розробники оперують такими трьома значеннями температури: максимальна температура охолоджуючого середовища –  $T_a$ ; максимально допустиме значення температури напівпровідникової структури приладу в робочому режимі роботи –  $T_{j(\text{op})}$ ; максимально допустиме значення температури напівпровідникової структури приладу в короткочасному режимі роботи –  $T_{j\text{max}}$  [1].

Теплоємність IGBT та діодів модулів інвертора відносно невелика, тому при визначенні теплового режиму роботи напівпровідникових приладів необхідна перевірка на не перевищення максимальної температури напівпровідникової структури IGBT та діодів не тільки після тривалого навантаження у номінальному режимі роботи (при номінальному значенні частоти обертання), а і в режимі пуску двигуна. Згідно технічного завдання на розробку електроприводу, в залежності від характеру механізму, визначається як початкові данні: номінальне значення статичного обертового моменту на валу електродвигуна –  $M_{\text{st}}$ , при певній кутовій частоті обертання ротору двигуна –  $\omega_L$ , та сумарний момент інерції виконуючого механізму і ротору двигуна –  $J$ .

Щоб на час розгону двигуна забезпечувався максимальний момент двигун повинен споживати такий струм: [2]

$$I_{1r} = \left( 1 + \frac{J \cdot \omega_L}{M_{\text{st}} \cdot t_r} \right) \cdot I_1, \quad (1)$$

де  $t_r$  – час розгону двигуна;  $I_1$  – значення струму, що споживає двигун в номінальному режимі роботи.

При цьому значення струму, що споживає двигун при розгоні не повинно перевищувати максимального значення струму, на яке налаштована система захисту перетворювача частоти, тобто  $I_{1r} \leq 1,5I_1$ .

Для визначення типового значення напруги у блокованому стані модуля IGBT спочатку визначається необхідне значення напруги ланки постійного струму за формулою [3]:

$$U_{dc} = (2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1) / (m \cdot \sqrt{3}), \quad (2)$$

де  $U_1$  – значення напруги живлення двигуна в номінальному режимі роботи;  $m$  – коефіцієнт модуляції ШІМ.

Типове значення напруги у блокованому стані IGBT модуля визначається згідно табл. 1 [4].

Значення номінального струму на виході інвертора  $I_{out}$  вибирається з ряду номінальних значень струмів:

$$I_{out} \geq I_1. \quad (3)$$

Номінальне значення струму IGBT модуля бажано вибрати виходячи з умови:

$$I_{Cnom} \geq (2 - 2,5) \cdot I_{out}, \quad (4)$$

Втрати потужності у IGBT складаються з двох складових: втрати потужності при протіканні струму у відкритому стані –  $P_{condT}$  та втрати потужності при комутації –  $P_{sw}$ .

Втрати потужності в IGBT у відкритому стані при тривалому режимі роботи у складі дворівневого інвертора напруги з урахуванням синусоїдальної залежності робочого циклу у часі в режимі ШІМ визначаються за формулою [5]:

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

де  $U_{CEO}$ ,  $r_{CE}$  – порогова напруга та динамічний опір транзистора, відповідно, при максимально допустимій робо-

**Таблиця 1.** Рекомендоване значення напруги IGBT модуля у блокованому стані в залежності від значення напруги ланки постійного струму

Номінальне значення напруги ланки постійного струму, В	Рекомендоване значення напруги приладу $U_{CES}$ , В
620	1200
900	1700
1800	3300
2800	4500
3600	6000
4000	6500

чої температурі напівпровідниковій структурі  $T_{j(op)}$ ;  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності навантаження інвертора (електродвигуна);  $I_m$  – амплітудне значення струму на виході інвертора розраховується за формулою:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_{out}, \quad (6)$$

де  $I_{out}$  – діюче значення струму навантаження інвертора.

Втрати потужності при комутації IGBT визначаються за формулою [5]:

$$P_{sw} = f_{sw} \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{b \cdot I_m}{\pi} + \frac{c \cdot I_m^2}{4} \right) \cdot \frac{U_{dc}}{U_{nom}}, \quad (7)$$

де  $f_{sw}$  – частота комутації, кГц;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти поліному, який апроксимує залежність витрат енергії при комутації IGBT від значення струму колектора;  $U_{nom}$  – значення напруги, при якому визначаються параметри вмикання та вимикання IGBT, В.

Слід зауважити, що необхідно ретельно відноситися до вибору значення частоти комутації. На основну гармоніку струму статору двигуна накладаються значні коливання з частотою комутації силових ключів, що при малому значенні частоти комутації негативно впливає на ізоляцію дротів обмоток статору двигуна. Окрім цього, можуть виникнути резонансні явища в системі асинхронний двигун – виконавчий механізм, які рекомендується усувати підвищенням частоти комутації. Значне підвищення частоти комутації може привести до недопустимого підвищення втрат потужності при комутації. Тому вибір частоти комутації пропонується робити у 2 етапи: спершу при частоті комутації в межах 5–10 кГц та при вибраному типі модуля визначити тип охолоджувача і умови охолодження у тривалому режимі роботи, а потім за методикою, що наведена в роботі [6], визначити максимально допустиме значення частоти комутації і зменшити його на 5–10 % на випадок короткочасного перевантаження. При цьому будуть найбільш сприятливі умови для роботи електроприводу.

Загальні втрати потужності у IGBT при тривалому режимі роботи визначаються як сума цих двох складових;

$$P_T = P_{condT} + P_{sw}. \quad (8)$$

Втрати потужності у діоді зворотного струму модуля IGBT визначаються аналогічним чином [5]:

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

де  $U_{F0}$ ,  $r_F$  – порогова напруга та динамічний опір діоду зворотного струму, відповідно, при максимально допустимому значенні робочої температури напівпровідникової структури  $T_{j(op)}$ .

Втрати потужності в діоді при відновленні замикаючої спроможності  $P_{\Gamma}$  визначаються за формулою, що аналогічна формулі (7):

$$P_{\Gamma} = f_{sw} \cdot \left( \frac{d}{2} + \frac{e \cdot I_m}{\pi} + \frac{f \cdot I_m^2}{4} \right) \cdot \frac{U_d}{U_{nom}}, \quad (10)$$

де  $d, e, f$  – коефіцієнти поліному, який апроксимує залежність витрат енергії при відновленні замикаючої спроможності діоду зворотного струму від значення струму колектора IGBT.

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

$$P_D = P_{condD} + P_{\Gamma}. \quad (11)$$

Визначення втрат потужності при розгоні двигуна у IGBT –  $P_{\Gamma}$  та у діоді –  $P_{Dr}$  необхідно робити за формулами (5)–(11) при таких значеннях струму [2]:

$$I_{m\Gamma} = I_m + (j \cdot \omega_L \cdot I_1) / (M_{st} \cdot t_r). \quad (12)$$

## ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ РОБОТИ IGBT МОДУЛЯ

Вибір типу IGBT модуля робиться на основі раніше визначених типових параметрів в режимі тривалого навантаження за амплітудним значенням струму колектора  $I_m$  згідно формули (6), напруги у блокованому стані  $U_{CES}$  згідно табл. 1.

Окрім цього, при виборі типу модуля IGBT бажано, щоб модуль мав у своєму складі якомога більше силових ключів для мінімізації індуктивності розсіювання контурів комутації. Необхідно також звернути увагу на специфічні особливості технології створення IGBT структур та конструкції корпусу. Для циклічних режимів роботи бажано вибирати модуль з притискними контактами (без пайки). Для інверторів напруги потужністю до 50 кВт бажано використовувати шести ключові модулі.

Щоб температура напівпровідникових структур транзисторів та діодів не перевищувала максимально допустиме значення, модулі завжди використовуються в комплекті з охолоджувачами, які відводять тепло в охолоджуюче середовище (повітря, вода).

Попереднє значення теплового опору охолоджувача визначається за формулою:

$$R_{th(h-a)} \leq \frac{T_{j(op)} - T_a - P_{\Gamma} \cdot R_{th(j-c)\Gamma} - N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_D) \cdot R_{th(c-h)M}}{N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_D)}, \quad (13)$$

де  $R_{th(h-a)}$  – тепловий опір охолоджувача;  $R_{th(j-c)\Gamma}$  – тепловий опір транзистора структура – основа модуля;  $N_{SM}$  – кількість силових ключів в модулі;  $R_{th(c-h)M}$  – тепловий опір контакту основа модуля – охолоджувач.

Після визначення попереднього значення теплового опору охолоджувача з довідникових даних на охолоджувачі вибирається його конкретний тип та режим охолодження (природна чи примусова конвекція повітря, чи певний виток води).

Значення температури структури IGBT у тривалому режимі роботи визначається за формулою [7]:

$$T_{j\Gamma} = P_{\Gamma} \cdot R_{th(j-c)\Gamma} + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_D) \cdot R_{th(c-h)M} + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_D) \cdot R_{th(h-a)} + T_a. \quad (14)$$

Аналогічним чином, значення температури структури діоду зворотного струму у тривалому режимі роботи визначається за формулою:

$$T_{jD} = P_D \cdot R_{th(j-c)D} + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_D) \cdot R_{th(c-h)M} + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_D) \cdot R_{th(h-a)} + T_a, \quad (15)$$

де  $R_{th(j-c)D}$  – тепловий опір структура діоду – основа модуля.

При цьому, температура контактної поверхні охолоджувача визначається за формулою:

$$T_{hs} = N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_D) \cdot R_{th(h-a)} + T_a. \quad (16)$$

Значення температури структури IGBT та діоду зворотного струму при розгоні двигуна визначається аналогічно з урахуванням струму  $I_{m\Gamma}$  за формулами:

$$T_{j\Gamma}(t) = P_{\Gamma} \cdot Z_{th(j-c)\Gamma}(t) + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_{Dr}) \cdot R_{th(c-h)M} + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_{Dr}) \cdot Z_{th(h-a)}(t) + T_a \begin{cases} t = t_r \\ t > 0 \end{cases}, \quad (17)$$

де  $Z_{th(j-c)\Gamma}(t)$  – перехідний тепловий опір IGBT структура – основа модуля для моменту часу  $t$ ;  $Z_{th(h-a)}(t)$  – перехідний тепловий опір охолоджувача для моменту часу  $t$ ;

$$T_{jDr}(t) = P_{Dr} \cdot Z_{th(j-c)D}(t) + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_{Dr}) \cdot R_{th(c-h)M} + N_{SM} \cdot (P_{\Gamma} + P_{Dr}) \cdot Z_{th(h-a)}(t) + T_a \begin{cases} t = t_r \\ t > 0 \end{cases}, \quad (18)$$

де  $Z_{th(j-c)D}(t)$  – перехідний тепловий опір структура діоду – основа модуля для моменту часу  $t$ .

## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ДО ФОРМУЛ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ І ПОТУЖНОСТІ ПРИ КОМУТАЦІЇ IGBT ТА ДІОДУ ЗВОРТНОГО СТРУМУ

Виконання розрахунків для визначення коефіцієнтів до формул втрат енергії при комутації IGBT та при відновленні замикаючої властивості діоду зворотного струму

виконується з використанням діаграм залежності  $E_{sw} = (E_{on} + E_{off}) = f(I_C)$  та  $E_{rr} = f(I_C)$  при максимально допустимому значенні робочої температури напівпровідникової структури  $T_{jop}$ , що наведені у довідникових даних на IGBT модуль, наприклад рис. 1.

Аналітичні вирази кривих, що наведені на рис. 1, можна представити у вигляді таких формул:

$$E_{sw} = E_{on} + E_{off} = (a + b \cdot I_C + c \cdot I_C^2); \quad (19)$$

$$E_{rr} = (d + e \cdot I_C + f \cdot I_C^2), \quad (20)$$

Значення коефіцієнтів  $a, b, c$  та  $d, e, f$  можна визначити за наступним алгоритмом:

1) На осі абсцис (рис. 1) вибираються два значення струму, що відповідають початку ( $X1$ ) та кінцю діаграм ( $X3$ ), значення струму ( $X2$ ) вибирається більшим ніж номінальне значення струму модуля IGBT –  $I_{Cnom}$  та, що співпадає з найближчим значенням координатної сітки (рис. 1 і 2). Причому, значення струму – , для якого в таблиці довідникових даних наведено значення втрат енергії, брати не бажано. Його треба залишити для контролю правильності визначення коефіцієнтів.

2) Для вибраних значень струму по діаграмам , (рис. 1) визначаємо відповідні значення втрат енергії –  $Y1, Y2, Y3$ . Значення втрат при комутації IGBT визначається як сума відповідних значень  $i$ .

3) В зв'язку з тим, що усі значення втрат енергії , які визначені у пункті 2) належать одній кривій, то рівняння (19) можна записати для кожного значення енергії:

$$\begin{cases} Y1sw = a + b \cdot X1 + c \cdot (X1)^2; \\ Y2sw = a + b \cdot X2 + c \cdot (X2)^2; \\ Y3sw = a + b \cdot X3 + c \cdot (X3)^2; \end{cases} \quad (21)$$

Вирішуючи сумісно ці три рівняння, отримуємо формули для визначення допоміжних коефіцієнтів  $A$  та  $B$ :

$$A = ((X3)^2 - (X1)^2) - (X2 + X1) \cdot (X3 - X1); \quad (22)$$

$$B = (Y3sw - Y1sw) - (Y2sw - Y1sw) \cdot (X3 - X1) / (X2 - X1). \quad (23)$$

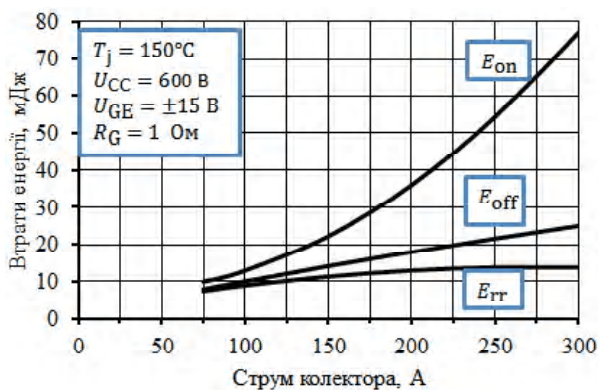


Рис. 1. Залежність втрат енергії при комутації модуля SKiP 39AC12T4V1 [9]

Основні коефіцієнти визначаються за такими формулами:

$$c = B / A; \quad (24)$$

$$b = \frac{Y2sw - Y1sw}{X2 - X1} - c \cdot (X2 + X1); \quad (25)$$

$$a = Y1sw - b \cdot X1 - c \cdot (X1)^2. \quad (26)$$

4) Аналогічним чином визначаються значення коефіцієнтів для діоду зворотного струму:

$$Br = (Y3r - Y1r) - (Y2r - Y1r) \cdot \frac{(X3 - X1)}{(X2 - X1)}; \quad (27)$$

$$f = Br / A; \quad (28)$$

$$e = \frac{(Y2r - Y1r)}{(X2 - X1)} - f \cdot (X2 + X1); \quad (29)$$

$$d = Y1r - e \cdot X1 - f \cdot (X1)^2. \quad (30)$$

5) Перевірку правильності визначення коефіцієнтів треба виконати підставивши їх у формули (19), (20) при значенні струму  $I_{nom}$ , для якого втрати енергії наведено в довідникових даних на прилад. Значення втрат потужності визначається множенням частоти комутації на втрати енергії в приладі.

Треба відзначити, що, якщо криві  $E_{sw} = (E_{on} + E_{off}) = f(I_C)$ ,  $E_{rr} = f(I_C)$  визначають втрати енергії у мДж (значення  $Y1, Y2, Y3$  у мДж), то і в результаті рішення за формулами (19), (20) теж буде у мДж. Виконання розрахунків за вищенаведеними формулами значно спрощується за допомогою електронної таблиці Excel, рис. 2.

### ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ РЕЖИМУ РОБОТИ IGBT МОДУЛЯ

За вищенаведеним алгоритмом було виконано ряд розрахунків при таких початкових даних: статичний обертовий момент навантаження  $M_{st} = 180 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; частота обертання магнітного поля двигуна  $n_0 = 1500 \text{ об/хв.}$ ; момент інерції виконуючого механізму  $J_{wm} = 3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; напруга живлення двигуна  $U_1 = 380 \text{ В}$ ; розгін двигуна відбувається при кількох значеннях часу  $t_r$  в інтервалі 1–6 с; температура охолоджуючого середовища (повітря)  $T_a = 45^\circ \text{C}$ .

В процесі виконання розрахунків було вибрано тип двигуна – AMX180M4 потужністю 30 кВт,  $\eta = 0,915$ ,  $\cos\phi = 0,87$ , момент інерції ротора –  $0,20 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  [8]; тип IGBT модуля – SKiP 39AC12T4V1, фірми SEMIKRON, який має такі параметри [9]:  $N_{SM} = 6$ ;  $U_{CES} = 1200 \text{ В}$ ;  $I_{Cnom} = 150 \text{ А}$ ;  $T_{jmax} = 175^\circ \text{C}$ ;  $T_{jop} = 150^\circ \text{C}$ ;  $U_{CE0} = 0,7 \text{ В}$ ;  $r_{CE} = 0,01 \text{ Ом}$ ;  $E_{on} = 22,5 \text{ мДж}$ ;  $E_{off} = 14 \text{ мДж}$  (згідно розрахунків, алгоритм яких наведено вище,  $a = 9,2$ ;  $b = 0,05333$ ;  $c = 0,00085$ );

Тип модуля:		SKiP 39AC12T4V1		
		Транзистор		
Позначення	X1	X2	X3	Ic nom
Значення струму	75	200	300	150
Позначення	Y1	Y2	Y3	E nom
Eop, мДж	10	36	77	22,5
Eoff, мДж	8	18	25	14
Esw, мДж	18	54	102	36,5
A	B	a	b	c
22500	19,2	9,2	0,05333	0,00085
Esw contr, мДж	36,40			
Похибка, %	-0,27			
Діод зворотного струму				
Позначення	Y1r	Y2r	Y3r	Err nom
Значення Err, мДж	7,5	13	13,8	11,4
A	B <sub>r</sub>	d	e	f
22500	-3,6	1,8	0,088	-0,0002
Err contr, мДж	11,4			
Похибка, %	0,00			

Рис. 2. Результати визначення значень коефіцієнтів поліномів

$R_{th(j-s)T} = 0,33$  К/Вт;  $U_{F0} = 0,9$  В,  $r_F = 0,0078$  Ом;  $E_{tr} = 11,4$  мДж (згідно розрахунків, алгоритм яких наведено вище,  $d = 1,8$ ;  $e = 0,088$ ;  $f = -0,0002$ );  $R_{th(j-s)D} = 0,52$  К/Вт,  $U_{nom} = 600$  В; тип охолоджувача – Р 16/200F [10], який при роботі в комплекті з вентилятором типу SKF 16B-230-01 має такі теплові параметри: тепловий опір  $R_{th(h-a)} = 0,039$  К/Вт, перехідний тепловий опір охолоджувача  $Z_{th(h-a)}(t)$  визначається за параметрами експонент [1], що наведені в табл. 2.

На рис. 3 представлено діаграми струму навантаження та температури напівпровідникових структур транзисторів і діодів в залежності від часу розгону двигуна, де  $T_{j tr}$  та  $T_{j D}$  – позначає температуру структури транзистора та діоду, відповідно;  $I_l$  – струм навантаження;  $I_m$  – амплітуда струму навантаження;  $T$  – означає тривалий режим навантаження.

Аналіз отриманих результатів розрахунків, які наведені на рис. 3, свідчить: режим пуску двигуна з часом розгону 1 с є недопустимий в зв'язку з надмірним нагрівом структури IGBT. При збільшенні часу розгону до 1,5 с структура IGBT при пуску двигуна нагрівається до максимально допустимого значення температури; криві зменшення температури структури IGBT і зменшення струму навантаження зі збільшенням тривалості розгону двигуна дуже подібні, в той час як крива спаду температури структури діоду зворотного струму значно повільніша, це обумовлено тим, що активна складова струму навантаження при розгоні двигуна значно більша ніж реактивна складова.

Як видно з формули (1) значення струму, що споживає двигун під час пуску, залежить не тільки від часу розгону, а і від значення моменту інерції. На рис. 4 показана залежність температури структури IGBT та амплітуди струму споживання від моменту інерції системи асинхронний двигун – виконавчий механізм при тривалості розгону 2 с.

Рис. 4 свідчить про значну кореляцію температури напівпровідникової структури IGBT та струму навантаження, тобто нагрів структури IGBT при великому значенні моменту інерції виконавчого механізму можна обмежити шляхом обмеження пускового струму.

Розроблена методика визначення теплового режиму IGBT модуля в складі перетворювача частоти при пуску асинхронного двигуна, яка ураховує параметри модуля, частоту комутації, режим охолодження модуля, тривалість пуску асинхронного двигуна, значення обертового моменту та момент інерції системи двигун – виконавчий механізм. Така методика розрахунку теплового режиму IGBT модуля, що враховує, практично, усі параметри, від яких залежить температура напівпровідникової струк-

Таблиця 2. Параметри експонент охолоджувача Р 16/200F

i	1	2	3	4
$R_i$ , К/Вт	0,0284	0,0076	0,0025	0,0005
$\tau_i$ , с	101,95	48	11,87	0,3796

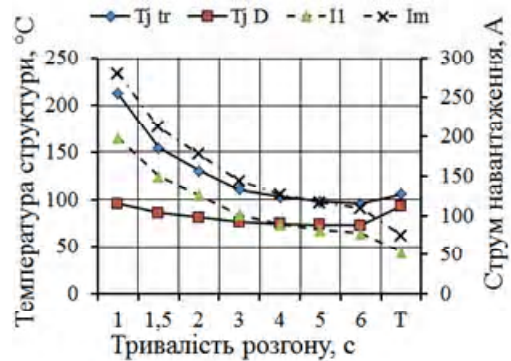


Рис. 3. Результати розрахунків

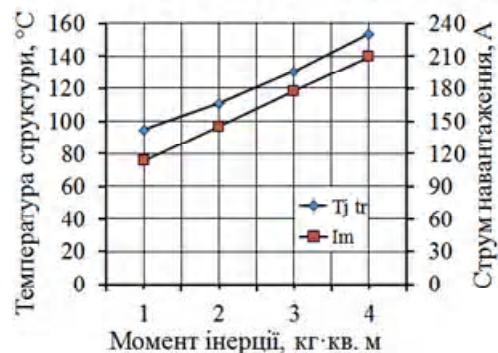


Рис. 4. Залежність температури структури транзистора і амплітуди струму навантаження від моменту інерції при тривалості розгону 2 с

тури IGBT, розроблена вперше. Використання розробленої методики розрахунку фізично обґрунтовує максимально допустиме значення струму перетворювача частоти.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблена методика виконання розрахунків для визначення температури IGBT модуля при пуску асинхронного двигуна в складі електроприводу змінного струму в залежності від статичного моменту навантаження, моменту інерції виконавчого механізму та часу розгону двигуна.

2. Занадто короткий час розгону двигуна, який задається темпом зростання частоти напруги живлення двигуна (від мінімального до номінального значення), може привести до надмірного підвищення температури напівпровідникової структури IGBT та до її пошкодження.

3. Зі збільшенням моменту інерції виконавчого механізму збільшується амплітуда струму навантаження інвертора при розгоні двигуна, а також і температура нагріву напівпровідникової структури IGBT, причому є добра кореляція між цими залежностями. Тому обмеження амплітуди струму, що споживає двигун під час пуску, також обмежує температуру напівпровідникових структур IGBT інвертора.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Thermal Design and Temperature Ratings of IGBT Modules [Електронний ресурс] = Теплове проектування та максимальні допустимі значення температури модулів IGBT. / Application Note I Thermal Design Doc. No. 5SYA 2093-00 Sept. 2011. / Режим доступу: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/754216faaa21d0e6c125791f0046de68/\\$file/5SYA%202093\\_00\\_thermal%20design%20of%20IGBT%20Modules.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/754216faaa21d0e6c125791f0046de68/$file/5SYA%202093_00_thermal%20design%20of%20IGBT%20Modules.pdf) (вільний). – Загол. з екрану.
2. Москаленко В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
3. PWM invertors [Електронний ресурс] = ШІМ інвертори / Adel Gastli / Глава 6 підручника: Удосконалення знань з силової електроніки (Advanced Power Electronics). – Електронні данні (1 файл, 995,86 КБ). [2006] – Режим доступу: [http://ape.gastli.net/Chapter4/APE\\_CN4.pdf](http://ape.gastli.net/Chapter4/APE_CN4.pdf) (вільний). – Загол. з екрану.
4. Voltage ratings of high power semiconductors. [Електронний ресурс] = Номінальне значення напруги силових напівпровідникових приладів / Bjorn Backlund, Eric Carroll / ABB Semiconductors – Електронні данні (1 файл). – Switzerland [2006] – Режим доступу: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/1c4234b4fa1cb5f4c12571e7004bed25/\\$file/5SYA%202051-00%20August%2006%20Voltage%20ratings%20of%20high%20power%20semiconductors.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/1c4234b4fa1cb5f4c12571e7004bed25/$file/5SYA%202051-00%20August%2006%20Voltage%20ratings%20of%20high%20power%20semiconductors.pdf), (вільний). – Загол. з екрану.
5. Applying IGBT [Електронний ресурс] = Застосування IGBT / Bjorn Backlund, Raffael Schnell, Ulrich Schlapbach, Roland Fischer, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors – Електронні данні (1 файл). – Switzerland [2012] – Режим доступу: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/f63a04e9734e7f0cc1257a590042f31c/\\$file/5SYA2053-04%20Applying%20IGBTs.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/f63a04e9734e7f0cc1257a590042f31c/$file/5SYA2053-04%20Applying%20IGBTs.pdf) (вільний). – Загол. з екрану.
6. Остренко В. С. Определение максимально допустимого значения частоты коммутации модуля IGBT / В. С. Остренко // Электротехника та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 28–33.
7. 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/skcompub/ko/section1\\_Power\\_Semiconductors\\_Basic\\_Operating\\_Principles\\_section2\\_Basics.pdf](http://www.semikron.com/skcompub/ko/section1_Power_Semiconductors_Basic_Operating_Principles_section2_Basics.pdf) (вільний). – Загол. з екрану.
8. ВЭМЗ Технический каталог [Електронний ресурс] = Каталог асинхронных двигателей/ВЭМЗ – Электронные данные (1 файл, 3,3 МБ). – [2010] – Режим доступу: <http://sp-electro.ru/downloads/vemp.pdf> (вільний). – Загл. з екрана.
9. SKiiP 39AC12T4V1 [Електронний ресурс] = Модуль IGBT/SEMIKRON – Електронні данні (1 файл, 371,75 КБ). [2011] – Режим доступу: [http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKiiP\\_39AC12T4V1\\_25231450.pdf](http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKiiP_39AC12T4V1_25231450.pdf) (вільний). – Загол. з екрану.
10. P 16 Heat sink [Електронний ресурс] = Охолоджувач P16/ SEMIKRON – Електронні данні (1 файл). [2005] – Режим доступу: [http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/Heatsink\\_KL\\_280\\_P16\\_200\\_mm\\_sawed\\_brushed\\_washed\\_41123790.pdf](http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/Heatsink_KL_280_P16_200_mm_sawed_brushed_washed_41123790.pdf) (вільний). – Загол. з екрану.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2013.

Після доробки 22.10.2013.

Остренко В. С.<sup>1</sup>, Критская Т. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, Запорожская государственная инженерная академия, Украина

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор, Запорожская государственная инженерная академия, Украина

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ IGBT МОДУЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Предложена методика выполнения расчетов для определения типа IGBT модуля, значений температуры структур транзисторов и диодов обратного тока в преобразователе частоты электропривода переменного*



тока при пуске двигателя в зависимости от статического момента и момента инерции исполнительного механизма. Приведены диаграммы зависимости температуры структур транзисторов и диодов обратного тока от значений продолжительности разгона и момента инерции системы асинхронный двигатель – исполнительный механизм.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, IGBT модуль, температура структуры, момент инерции.

Ostrenko V. S.<sup>1</sup>, Kritska T. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Candidate of Technical Sciences, associate professor, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Ukraine

<sup>2</sup>Dr. of Technical Sciences, Professor, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Ukraine

### TEMPERATURE CALCULATION OF IGBT MODULE FREQUENCY CONVERTOR AT START OF INDUCTION MOTOR

The most effective and economical way to a smooth start and control the rotor speed of the induction motor is to change the frequency of the voltage supply. During acceleration of the motor it is necessary to ensure not only the actuator static torque, and the dynamic inertia overcoming. Thus, the value of the dynamic moment of inertia depends on the time of increasing the motor rotational speed. To overcome this dynamic torque on the engine during acceleration, stator windings create additional magnetic field due to increase current consumption. Typically, it is desirable that the duration of the engine acceleration was minimal, i.e. , the acceleration is maximized. This may cause excessive increase in the output current of the frequency converter and damage of bipolar transistors with insulated gate (IGBT), which power switches are used.

To ensure reliable operation of AC Drivers the method to perform calculations to determine the type of IGBT module, temperatures structures of transistor and inverse diode of the inverter; when starting the engine, depending on the load torque and the moment of inertia of the actuator is proposed.

Method for determination of the values of the polynomials coefficients that approximate energy IGBT switching losses and reverse diode recovery losses depending on the value of the collector current IGBT is proposed.

A method for determination of the required values of heat sink thermal resistance, which cool IGBT module is proposed.

Charts of the transistor temperature dependence and inverse diode values of the acceleration duration and of induction motor inertia – the actuator are shown.

**Keywords:** induction motor, IGBT module, power losses, junction temperature, inertia moment.

### REFERENCES

1. Thermal Design and Temperature Ratings of IGBT Modules [Electronic resource] / Application Note I Thermal Design Doc. No. 5SYA 2093-00 Sept. 2011./ access mode: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/754216faaa21d0e6c125791f0046de68/\\$file/5SYA%202093-00\\_thermal%20design%20of%20IGBT%20Modules.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/754216faaa21d0e6c125791f0046de68/$file/5SYA%202093-00_thermal%20design%20of%20IGBT%20Modules.pdf) (free). – Title Screen.
2. Moskalenko V. V. Elektricheskiy privod. Moscow, Izdatelskiy Tsentr «Akademiya», 2007, 368 p.
3. PWM invertors [Electronic resource] /Adel Gastli/ Chapter 6 Advanced Power Electronics. – Electronic data (1 file, 995,86 KB). [2006] – access mode: [http://ape.gastli.net/Chapter4/APE\\_CH4.pdf](http://ape.gastli.net/Chapter4/APE_CH4.pdf) (free). – Title Screen.
4. Voltage ratings of high power semiconductors. [Electronic resource]= / Bjurn Backlund, Eric Carroll / ABB Semiconductors – Electronic data (1 file). – Switzerland [ 2006] – access mode: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/1c4234b4fa1cb5f4c12571e7004bed25/\\$file/5SYA%202051-00%20August%2006%20Voltage%20ratings%20of%20high%20power%20semiconductors.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/1c4234b4fa1cb5f4c12571e7004bed25/$file/5SYA%202051-00%20August%2006%20Voltage%20ratings%20of%20high%20power%20semiconductors.pdf), (free). – Title Screen.
5. Applying IGBT [Electronic resource] / Bjorn Backlund, Raffael Schnell, Ulrich Schlapbach, Roland Fischer, Evgeny Tsyplakov / ABB Semiconductors – Electronic data (1 file). – Switzerland [ 2012] – access mode: [http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/f63a04e9734e7f0cc1257a590042f31c/\\$file/5SYA2053-04%20Applying%20IGBTs.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/f63a04e9734e7f0cc1257a590042f31c/$file/5SYA2053-04%20Applying%20IGBTs.pdf) (free). – Title Screen.
6. Ostrenko V. S. Opređenje maksimalno dopustimoga znacheniya chastoty kommutatsii modulja IGBT, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2012, No. 2, pp. 28–33.
7. Application Manual Power Semiconductors [Electronic resource] / Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann/SEMIKRON International GmbH [2011] – access mode: [http://www.semikron.com/skcompub/ko/section1\\_Power\\_Semiconductors\\_Basic\\_Operating\\_Principles\\_section2\\_Basics.pdf](http://www.semikron.com/skcompub/ko/section1_Power_Semiconductors_Basic_Operating_Principles_section2_Basics.pdf) (free). – Title Screen.
8. VEMZ Tekhnicheskiy katalog [Electronic resource]= Katalog asinkhronnykh dvigateley/ VEMZ – Electronic data (1 file, 3,3 MB). – [2010] – access mode: <http://sp-electro.ru/downloads/vemp.pdf> (free). – Title Screen.
9. SKiiP 39AC12T4V1 [Electronic resource] /SEMIKRON – Electronic data (1 file, 371,75 KB). [2011] – access mode: [http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKiiP\\_39AC12T4V1\\_25231450.pdf](http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKiiP_39AC12T4V1_25231450.pdf) (free). – Title Screen.
10. P 16 Heat sink [Electronic resource] / SEMIKRON – Electronic data (1 file). [2005] – access mode: [http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/Heat-sink\\_KL\\_280\\_P16\\_200\\_mm\\_sawed\\_bushed\\_washed\\_41123790.pdf](http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/Heat-sink_KL_280_P16_200_mm_sawed_bushed_washed_41123790.pdf) (free). – Title Screen.