

Факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, Київ, вул. Ак. Янгеля 16/9, корп. 12, тел.: (044) 454-94-32, ел. пошта: ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua
hte@el.ntu-kpi.kiev.ua

РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вступ

При розробці силових електронних перетворювачів для транспортних засобів необхідно приділяти значну увагу перехідним електричним та тепловим процесам, розраховувати граничні режими роботи напівпровідникових приладів, попереджувати та запобігати переходу роботи пристроїв в аварійні режими. При запуску електронних двигунів, зміні частоти роботи, в перетворювачах можуть виникати перехідні електричні та теплові процеси, які здатні вивести систему з ладу.

Звичайно теплові розрахунки при проектуванні перетворювальних пристроїв проводять в усталених режимах. Особливістю таких розрахунків є те, що компоненти обираються з суттєвим завищенням гранично допустимих параметрів пасивних та напівпровідникових приладів. Це суттєво впливає на габарити, ціну і надійність пристроїв. Разом з тим в класичних підходах до розрахунку електромагнітних та теплових процесів не звертається достатня увага на перехідні теплові процеси в пускових режимах роботи та при стрибках навантаження, які можуть привести обладнання до виходу з ладу.

Основна частина

Для зручності розрахунків і дослідження аварійних режимів роботи, перебіг процесів в перетворювачі можна розділити на три етапи. Перший етап – це швидкоплинні процеси, які відбуваються в області малих часів після ввімкнення пристрою. Даний етап характеризується сильним нагрівом кристалів напівпровідникових приладів при незначній зміні температури корпусу. Наступний етап – пониження граничного допустимого струму внаслідок нагріву напівпровідникових компонентів. Останній етап суміщеного перехідного електромагнітного та теплового процесу належить до області великих часів. Цей етап характеризується нагрівом індуктивності та ємності при довгій безперервній роботі перетворювача який суттєво впливає на їхні параметри.

Для прикладу розглянемо перехідні електромагнітні та теплові процеси в понижувальному широтно-імпульсному перетворювачі (ШІП), схему якого зображено на рис. 1.

При роботі напівпровідникових приладів внаслідок наявності теплового опору між кристалом та корпусом, кристали приладів нагріваються настільки швидко, що їх температура не встигає передаватись на корпус, і в момент запуску перетворювача температура переходу може досягти граничних значень температур при незначній зміні температури корпусу.

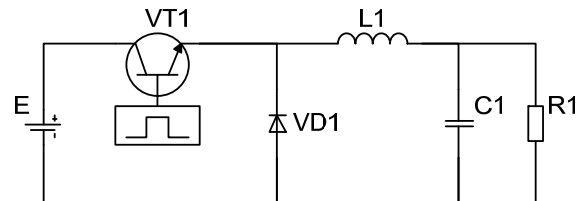


Рис. 1. Схема понижувального ШІП

Переважна більшість параметрів транзисторів і діодів залежать від температури кристалу. Для вірної інтерпретації даних з довідників, їх необхідно брати з урахуванням, що вони приведені при температурі 25 °С і можуть бути перетворені для максимальної робочої температури за допомогою інших приведених параметрів.

Необхідне зменшення струму виявляється за допомогою прямої і зворотної розсіюваної потужності, яка також залежить від температури, а також із втрат при комутації.

На рис. 2 зображено залежність опору між стоком і витокм силового MOSFET транзистору SL30B60K від температури корпусу. Даний опір практично подвоюється в діапазоні температур 25 °С...125 °С. При температурі 80 °С можна використовувати лише 75 % від максимального струму стоку навіть в статичному режимі.

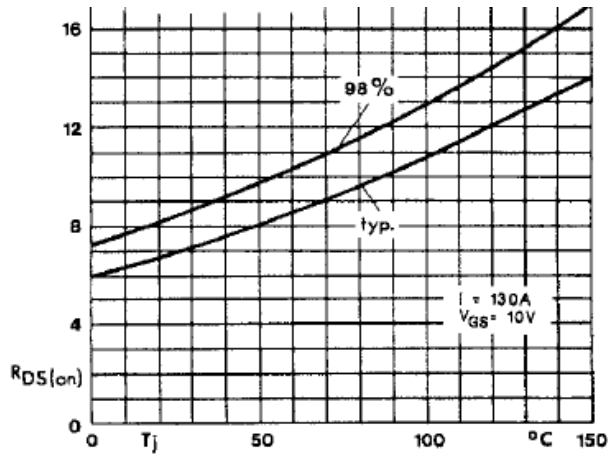


Рис. 2. Опір силового MOSFET у відкритому стані при зміні температури

Звичайно при перехідному процесі аналітично дану залежність розрахувати практично неможливо, адже перерахунок температур необхідно проводити майже на кожному періоді роботи приладів, а після цього ще й коректувати подальшу перехідну криву. Тому для розрахунку і подальшого моделювання теплових перехідних процесів можна скористуватися наступною залежністю [2]:

$$R_{CB} = R_{CB_0} \cdot \left[T \cdot \frac{1.024 \cdot U_{CB}^{0.1124} - 1}{100} + \frac{5 - 1.024 \cdot U_{CB}^{0.1124}}{4} \right],$$

де R_{CB_0} – опір між стоком та витіком при $T_0=25^\circ\text{C}$, T – діюча температура, U_{CB} – напруга сток-витік.

При визначенні аварійних електричних режимів слід врахувати зменшення струму стоку з ростом температури (рис. 3).

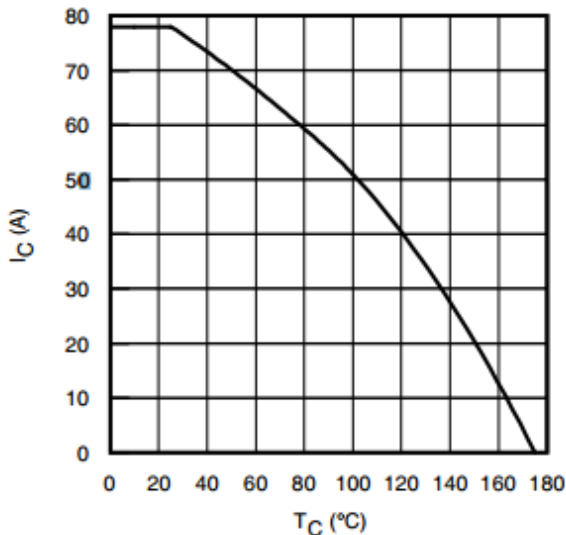
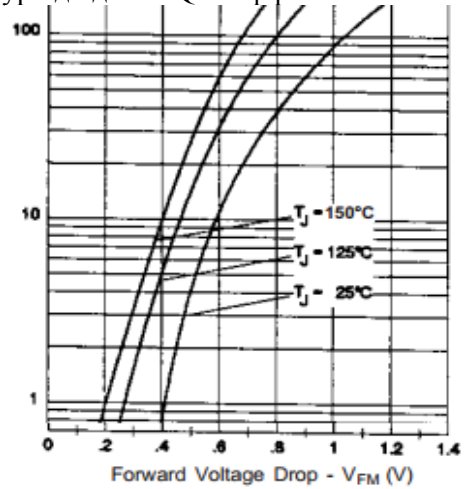


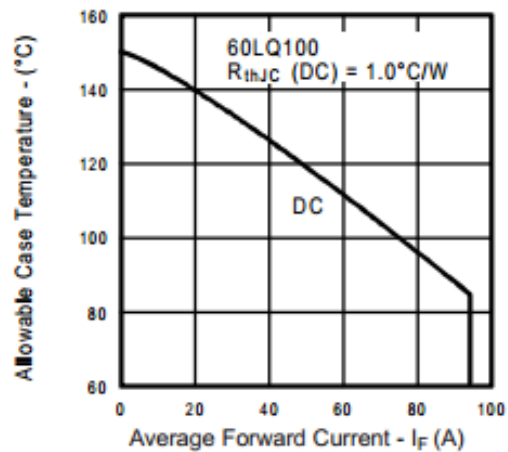
Рис. 3. Залежність струму стоку від нагріву кристала транзистора

При розрахунку теплових режимів роботи діодів, необхідно приділити увагу залежності

опору та прямого падіння напруги від температури. Аналітичний розрахунок перехідних процесів також надзвичайно складний внаслідок необхідності корекції параметрів моделі. На рис. 4 показані температурні залежності струму і напруги, а також залежність струму від температури діода 60LQ100 фірми IRF.



а)



б)

Рис. 4. Температурні залежності: а) максимального падіння напруги при прямому зміщенні; б) максимального прямого струму

При формуванні моделі ШПП можна використовувати наступні аналітичні залежності від температури опору діода та падіння напруги [2]:

$$R_{VD} = R_{VD_0} \cdot \left(1 + \frac{T - 20}{298} \right),$$

$$U_{VD} = U_{VD_0} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 20),$$

де R_{VD_0} , U_{VD_0} – прямий опір та напруга за нормальних умов, згідно даних виробника.

В середовищі Matlab була побудована модель понижувального ШПП в якій були враховані описані вище температурні залежності для діода та транзистора. Така система досить зру-

чна для моделювання у зв'язку з тим, що залежності описуються мовою С++ у файлі скрипті, а цей файл пов'язується з системою симуляції Simulink.

Симуляція проводиться наступним чином. Спочатку задаються параметри всіх компонентів при температурі оточуючого середовища 25°C. Потім проводяться розрахунки електромагнітних процесів та температури на кожному періоді роботи ШПП. На початку кожного нового циклу програма проводить перерахунок поточного теплового стану та коригує значення поточних параметрів напівпровідникових приладів які використовуються при розрахунках на наступному періоді роботи ШПП.

При моделюванні перехідних електромагнітних та теплових процесів в ШПП використовувались наступні компоненти та режими роботи:

- дискретний IGBT транзистор SL30B60K, розрахований на максимальний струм колектору 78А при температурі 25°C, 50А при температурі 100°C;
- діод 60LQ100;
- індуктивність 1мГн;
- ємність 1мкФ;
- опір навантаження $R = 5 \text{ Ом}$;
- частота роботи ШПП 20 кГц при скважності 2;
- напруга джерела живлення складала 100В;
- початкова температура оточуючого середовища 25°C.

Попередньо був проведений розрахунок теплового режиму роботи з використанням класичного підходу, за сталим режимом роботи. За цими розрахунками нагрів напівпровідникових компонентів досягає робочої точки в 80°C. Після розрахунків при цій температурі параметрів напівпровідникових приладів, був розрахований усталений режим роботи.

З результатів симуляції у середовищі Matlab випливає, що під час перехідного процесу спостерігається виплеск температур кристалу транзистора, який не встигає передатись на охолоджувач, так як нагрів проходить за короткий інтервал часу. Внаслідок чого транзистор пропускає менший струм, і діод не досягає нагріву розрахованої робочої точки (рис. 5), а отже теоретичні розрахунки при робочій точці обох компонентів в 80 °C будуть невірними.

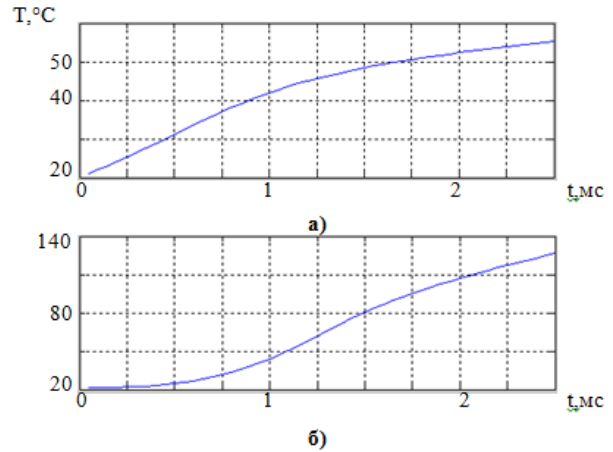


Рис. 5. Нагрів під час перехідного процесу кристалу: а) діода, б) транзистора

Внаслідок перебігу теплового електромагнітного процесу можливі наступні проблеми в період запуску перетворювача:

1. Вихід з ладу транзистору під час перехідного процесу внаслідок перегріву;
2. Перехід перетворювача в аварійний режим роботи внаслідок перевищення гранично допустимого струму транзистора при даній температурі;
3. Нехватка струму навантаження для коректної роботи двигуна, замість рівномірного зростання, струм починає спадати ізза перегріву транзистора (рис. 6).

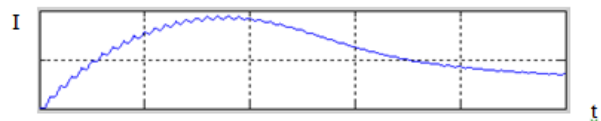


Рис. 6. Струм навантаження під час перехідного процесу при стрімкому нагріві кристалу транзистора

Висновок

З даних результатів випливає, що доступні методи розрахунку теплових та електромагнітних процесів потребують значних вдосконалень, адже навіть завищення параметрів компонентів не дасть гарантованої роботи перетворювачів в екстремальних режимах роботи. При швидкоплинних процесах неможливо утримати температуру кристалу напівпровідникових приладів на рівні робочої точки, а значить необхідно розглядати суміщені електротеплові процеси і компенсувати потенційні переходи перетворювача в аварійний режим роботи під час перехідного процесу.

REFERENCES

1. Soule, C. Thermal Management of IGBT Power Modules. PCIM 1995, Nürnberg, Proc. Power Electronics.

2. Malina D. Accelerated synthesis of electrically and thermally constrained power electronic converter systems. – Technische Universiteit Eindhoven, 2007.

Надійшла до друку 20.03.2013.

Статтю рекомендовано до друку д.т.н., професором *П. Д. Андриєнком*

У статті на прикладі понижувального широтно-імпульсного перетворювача показані проблеми, що можуть виникнути при роботі перетворювачів, розрахованих сучасними методами розрахунку електромагнітних та теплових процесів. Приведені результати розрахунку перехідних електромагнітних процесів з температурною корекцією на кожному періоді перехідного процесу. Створена модель, що дозволяє розрахувати суміщені перехідні електромагнітні та теплові процеси в перетворювачах. Такий розрахунок дозволяє підвищити точність визначення аварійних режимів роботи, а також більш точно визначити параметри компонентів перетворювача.

Ключові слова: перетворення енергії, широтно-імпульсна модуляція, процеси, електромагнітні, теплові.

УДК 621.314

Р. А. БАРАНЮК, В. А. ТОДОРЕНКО, А. И. ТЮРЮТИКОВ (НТУУ «КПІ»)

Факультет електроніки, Национальний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, Київ, ул. Ак. Янгеля 16/9, корп. 12, тел.: (044) 454-94-32, ел. пошта: ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua hte@el.ntu-kpi.kiev.ua

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В статье на примере понижающего широтно-импульсного преобразователя показаны проблемы, которые могут возникнуть при работе преобразователей, рассчитанных современными методами расчета электромагнитных и тепловых процессов. Приведены результаты расчета переходных электромагнитных процессов с температурной коррекцией на каждом периоде переходного процесса. Создана модель, позволяющая рассчитать совмещенные переходные электромагнитные и тепловые процессы в преобразователях. Такой расчет позволяет повысить точность определения аварийных режимов работы, а также более точно определить параметры компонентов преобразователя.

Ключевые слова: преобразование энергии, широтно-импульсная модуляция, процессы, электромагнитные, тепловые.

Статью рекомендовано к печати д.т.н., профессором *П. Д. Андриєнком*

UDC 621.314

R. A. BARANYUK, V. A. TODORENKO, A. I. TYURYUTIKOV (NTUU KPI)

Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 03056, Kyiv, 16/9 Academician Yangel Street, build. 12, tel.: (044) 454-94-32, e-mail: ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua hte@el.ntu-kpi.kiev.ua

CALCULATION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC AND THERMAL PROCESSES IN POWER CONVERTERS

The article is an example of downward pulse-width converter shows the problems that can arise when using converters designed modern methods of calculating the electromagnetic and thermal processes. The results of calculation of transient electromagnetic processes with temperature correction for each period of transition. The model, which allows to calculate the combined transient electromagnetic and thermal processes in the converter. This calculation can improve the accuracy of the emergency modes, and more accurately determine the parameters of the components of the converter.

Keywords: energy conversion, pulse width modulation, processes, electromagnetic, thermal.

Prof. *P. D. Andrienko*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.