

УДК 621.314

Р.А. Баранюк, В.А. Тодоренко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Тепловий захист імпульсних перетворювачів електроенергії

В даній статті, опираючись на електричні та теплові моделі компонентів імпульсних перетворювачів електроенергії, описується шлях до забезпечення теплового захисту як на методологічному рівні, встановлюючи межі безпечної роботи пристрою, так і схемотехнічному рівні, додаючи до схеми пристрою додаткові ланцюги, а саме ланцюг зворотного зв'язку відносно температури. Системи теплового захисту, побудовані за таким принципом, що регулюючи вхідну частоту та насиченість магнітного поля котушки фільтра перетворювача, забезпечують плавне і якісне регулювання режимів роботи пристрою, усуваючи небезпеку теплових аварій.

Бібл. 3, рис. 5.

Ключові слова: аварійні режими; теплові моделі; понижуючий ШІП; перехідні процеси; теплопередача; власні значення матриці.

Вступ

Задачею теплового захисту є запобігання теплових аварійних режимів роботи пристрою та перевищення максимально допустимих електромагнітних та теплових значень параметрів компонентів; запобігання виходу з ладу пристрою внаслідок дії на нього аварійних струмів; створення пристроїв захисту.

Тепловий захист напівпровідникових перетворювачів електроенергії можна реалізувати на методологічному та технічному рівні. Методологічний рівень являє собою розрахунки, моделювання та прогнозування переходу пристроїв у аварійні режими роботи, усунувши їх включенням у розрахунки при проектуванні. Технічною реалізацією теплового захисту є додаткові системи та пристрої, які усувають аварії під час роботи перетворювача. Дані пристрої повинні задовольняти такі вимоги як: швидкодія, надійність, селективність.

В разі швидкої реакції систем захисту можна виявити аварійні режими на ранній стадії виникнення та обмежити до мінімуму аварійний струм та викликаний ним перегрів або інші види небезпечних впливів. Тим самим забезпечується цілісність напівпровідникового пристрою, зво-

дяться до мінімуму наслідки аварій у навантаженні та зміщення робочої точки внаслідок зміни параметрів перехідного процесу.

Теплове моделювання

Під час моделювання теплових процесів в імпульсних перетворювачах електроенергії необхідно розділити режими роботи пристрою на повторно-короточасні та установлені. В повторно-короточасних режимах роботи важливу роль відіграють теплові процеси у напівпровідникових приладах внаслідок теплової ємності. Теплопередачу з кристалу напівпровідникового приладу до навколишнього середовища можна описати еквівалентним ланцюгом на рис. 1.

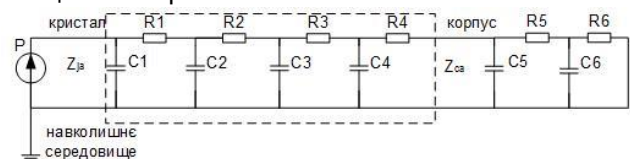


Рис. 1. Еквівалентний RC ланцюг теплопередачі з кристалу в навколишнє середовище

Кількість ланцюгів даної схеми обирається такою ж, як і кількість ітерацій математичного моделювання теплових процесів (у випадку, як на рис. 1, береться 4 ланцюги теплопередачі з кристалу до корпусу приладу і 2 ланцюги на тепловідвід та передачу в навколишнє середовище).

Теплова ємність залежить від складу матеріалів між кристалом та корпусом, а також їх склеювання. Нагрів кристалу можна розрахувати як [1]:

$$T_j(t) = T_c(t) + P(t) \cdot Z_{thjc}(t),$$

де T_j – температура кристалу, T_c – температура корпусу, P – розсіювання потужності, Z_{thjc} – тепловий імпеданс, що розраховується за допомогою даних виробника або за формулою:

$$Z_{thjc}(t) = \sum_{i=1}^n R_{th,i} \left(1 - e^{-\frac{t}{C_{th,i} R_{th,i}}} \right),$$

де R_{th} та C_{th} – теплові опір та ємність.

Під час ударів струму або комутаціях ключових напівпровідникових приладів кристал приладу може перевищувати 100°C навіть при наявному тепловідводі та температурі корпусу, рівній температурі навколишнього середовища. Наприклад, на рис. 2 зображено перехідний тепловий процес при подачі імпульсу граничного струму на MOSFET транзистор IRFP4232 при температурі корпусу та тепловідводу, що зростає до 50°C [2].

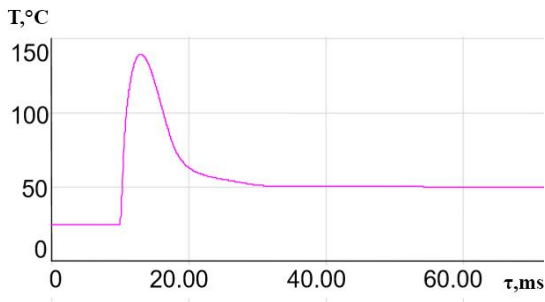
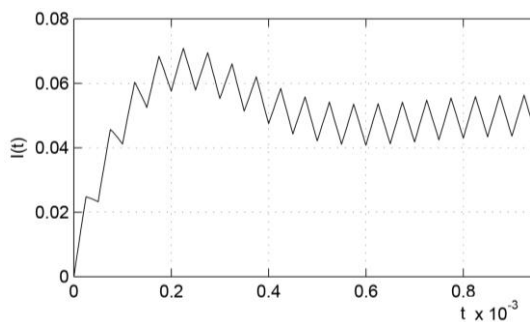


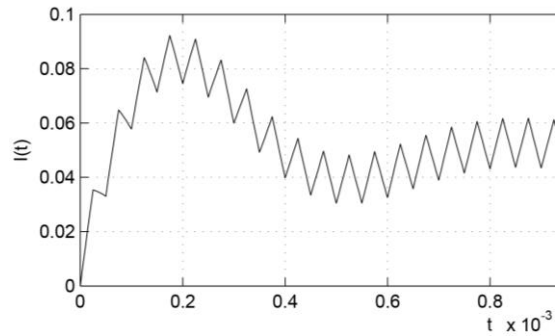
Рис. 2. Тепловий перехідний процес транзистора IRFP4232

У повторно-короткочасних режимах роботи теплові режими можуть також визначатися попередніми установленими режимами роботи. Повторне ввімкнення пристрою або накид навантаження та, як наслідок, новий перехідний процес, що буде протікати при нагрітих пасивних компонентах із заниженими внаслідок нагріву максимально-допустимими значеннями параметрів активних компонентів, може призвести до аварії пристрою.

На рис. 3 зображені перехідні струми понижувального широто-імпульсного перетворювача другого порядку при різних температурах пасивних компонентів пристрою при $E = 100V$, $L = 0,1\mu H$, $C = 0,1\mu k\Phi$, $r = 0,021\Omega m$, $R = 1k\Omega m$, $f = 20k\Gamma c$.



а)



б)

Рис. 3. Струм навантаження понижувального ШПІ при температурі пасивних компонентів: а) 25°C; б) 90°C

Дане збільшення коливальної складової перехідного процесу може бути недопустимим для компонентів, що внаслідок нагріву мають понижені граничні значення струму та напруги. Тому для забезпечення безпечної роботи, необхідно врахувати дані зміни та проектувати пристрій на компонентах з певним запасом (методологічний метод теплового захисту) або вводити додаткові пристрої чи системи, які відключають даний ланцюг від живлення в момент небезпеки, а краще всього скоректують перебіг перехідного процесу, збільшуючи його час, тим самим зменшуючи його коливальність (схемотехнічні методи теплового захисту).

Моделювання теплового захисту

Рівняння стану системи має вигляд:

$$\frac{dX}{dt} = AX + B$$

де X – вектор змінних стану, A – матриця коефіцієнтів, B – матриця зовнішнього впливу. Оскільки перехідні електромагнітні процеси мають тривалість від мікросекунд до секунд, а теплові процеси тривають годинами, матриця коефіцієнтів A є погано обумовленою і потребує розкладання на електричну складову з коефіцієнтами, що відповідають електричним параметрам компонентів схеми за нормальних умов, та теплову складову, що відповідає зміні електричних параметрів компонентів внаслідок нагріву, переведених в чисельну форму, наприклад за допомогою регресійних методів.

Вимірявши для прикладу ємність конденсатора Epcos B43415 [3] при різних температурах, отримуємо залежність як на рис. 4.

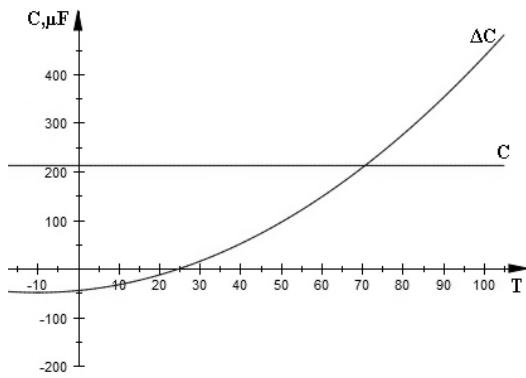


Рис. 4. Теплове розкладання ємності конденсатора

В даному представленні C – електрична складова матриці коефіцієнтів, ΔC – розрахована регресійним методом теплова складова.

При даному підході, аналогічно розклавши параметри компонентів схеми на теплову і електричну складові, отримуємо дві добре обумовлені матриці.

Розв'язком даної диференційної системи являється вираз, у якому перебіг перехідного процесу імпульсного перетворювача характеризує матрична експонента e^{At} , форма якої, в свою чергу, визначається власними значеннями λ матриці A . Якщо власні значення матриці є дійсними, перехідний процес має аперіодичний характер, що запобігає небезпеці аварій і уникає ударів струму та небезпечного значення теплових ударів кристалу напівпровідникових приладів. При комплексних власних значеннях процес являється коливальним, ступінь коливальності при цьому залежить від відстані даних значень до комплексної осі. Маючи рівняння:

$$\det(A - \lambda I) = \lambda^2 + b \cdot \lambda + c = 0$$

та підставивши середнє геометричне значення $\Omega = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2}$ маємо:

$$\lambda^2 + \frac{b}{\Omega} \cdot \Omega \cdot \lambda + \Omega^2 = \lambda^2 + B \cdot \Omega \cdot \lambda + \Omega^2 = 0,$$

де B характеризує криву перехідного процесу, а Ω – масштаб часу перехідного процесу. За допомогою даного рівняння можна, змінюючи параметри компонентів схеми, регулювати форму перехідного процесу, наприклад для запобігання аварії, збільшуючи величину Ω та зменшуючи внаслідок цього ступінь коливальності, отримуємо з небезпечного коливального процесу аперіодичний процес.

Використовуючи теплові моделі компонентів схеми, було створено систему теплового захисту імпульсних перетворювачів електроенергії,

яка працює за принципом зворотного зв'язку щодо температури. Розглянемо для прикладу роботу даної системи для схеми понижувального ШІП (рис. 5).

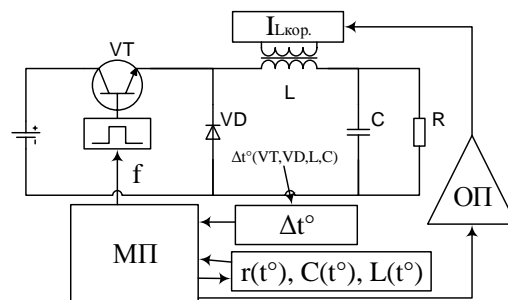


Рис. 5. Система теплового захисту понижувального ШІП

Від теплових датчиків до мікропроцесора поступають значення температури компонентів перетворювача. Згідно теплових моделей компонентів схеми, розраховуються динамічні значення (теплова складова матриці коефіцієнтів системи). При зміні частоти ключового транзистора регулюються імпеданс котушки індуктивності та конденсатора, за допомогою чого відбувається керування розсіюванням потужності пасивних компонентів та форма залежностей магнітної проникності магнітопроводу та ємності конденсатора від температури. Також здійснюється керування насиченістю магнітного поля котушки індуктивності фільтру перетворювача за допомогою магнітно пов'язаної котушки, що працює при постійному струмі, величина якого регулюється мікропроцесором через операційний підсилювач. За допомогою даного підключення, керуючи насиченістю магнітного поля котушки, кардинально змінюється залежність магнітної проникності магнітопроводу від температури, що дозволяє стабілізувати перехідний процес і навіть змінити його характер в разі небезпеки аварії.

Висновки

Забезпечення теплового захисту як методологічним способом, так і схемотехнічними методами потребує теплового моделювання системи. За допомогою аналізу характеристичних коренів системи на комплексній площині, маючи розділені теплові та електричні моделі компонентів, можна спрогнозувати та уникнути теплової аварії перетворювача. Також при схемотехнічній реалізації теплового захисту не є достатнім лише відключення пристрою. Регулюючи параметри компонентів, здатних стабілізувати електричні параметри системи, змінені вна-

слідок нагріву, можна повернути характер електромагнітних процесів перетворювача в необхідний робочий діапазон, усунути стрибки струму та напруги при небезпечних температурах компонентів, цим самим розширивши межі робочих температур пристрою.

Список використаних джерел

1. T. Schutze, "Thermal equivalent circuit models. Application note" Germany, Infineon Technologies AG, 2008. 10p.

2. D. Divins, "Using Simulation to Estimate MOSFET Junction Temperature in a Circuit Application", International Rectifier, Power Electronics Technology Exhibition & Conference, 2007. 27p.
3. Aluminium Electrolytic Capacitors. Capacitors for pulse applications. Germany, Epcos AG, 2014. 40p.

Поступила в редакцію 9 августа 2016 г.

УДК 621.314

Р.А. Баранюк, В.А. Тодоренко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Тепловая защита импульсных преобразователей электроэнергии

В данной статье, опираясь на электрические и тепловые модели компонентов импульсных преобразователей электроэнергии, описывается путь к обеспечению тепловой защиты как на методологическом уровне, устанавливая пределы безопасной работы устройства, так и схемотехническом уровне, добавляя к схеме устройства дополнительные цепи, а именно цепь обратной связи по температуре. Системы тепловой защиты, построенные по такому принципу, регулируя входную частоту и насыщенность магнитного поля катушки фильтра преобразователя, обеспечивают плавное и качественное регулирование режимов работы устройства, предотвращая опасность тепловых аварий. Библи. 3, рис. 5.

Ключевые слова: аварийные режимы; тепловые модели; понижающий ШИП; переходные процессы; теплопередача; собственные значения матрицы.

UDC 621.314

R. Baraniuk, V. Todorenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

Heat protection of pulse converters

In this article, based on electrical and thermal models of pulsed converters components, way to make heat protection both with using methodological methods, pointing the limits of safe operation, and adding to the electrical circuit additional devices as feedback temperature coupling is described. Heat protection systems built on this principle, adjusting input frequency and magnetic field intensity of inductor, ensure smooth and quality control of devices operational modes, preventing risks of thermal emergency. References 3, figures 5.

Keywords: emergency operation; thermal models; buck converter; transients; heat transfer; eigenvalue.

References

1. Schutze, T. (2008) Thermal equivalent circuit models. Application note. Germany: Infineon Technologies AG. P. 10.
2. Divins, D. (2007) Using Simulation to Estimate MOSFET Junction Temperature in a Circuit Application. International Rectifier, Power Electronics Technology Exhibition & Conference. P. 27
3. TDK (2014) Aluminium Electrolytic Capacitors. Capacitors for pulse applications. Germany: Epcos AG. P. 40.