

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОНИЖУЮЧОМУ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ВРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ

Вступ

Проблема перегріву напівпровідникових перетворювальних пристроїв, які використовуються на залізничному транспорті, є доволі актуальною. Особливо важливою ця проблема є для перетворювальних пристроїв, які працюють у ключовому режимі з нестационарними робочим інтервалом та паузою. Тривалість робочого інтервалу та паузи у цьому випадку залежать лише від дій користувача. Робота таких пристроїв проходить в постійних пускових перехідних електромагнітних процесах. Характер перехідних процесів та нагрів елементів перетворювачів у такому випадку залежать не лише від поточного навантаження, а і від попередніх режимів роботи.

Для розрахунків даних пристроїв необхідно аналізувати як перехідні та сталі електромагнітні процеси, так і перехідні теплові процеси.

Одним з напрямків розрахунку таких силових пристроїв є розрахунок суміщених електромагнітних та теплових процесів, оскільки при перехідних процесах нагрів та зміна параметрів компонентів є суттєвими. Зміна параметрів пасивних компонентів перед початком та протягом перехідного процесу може призвести до зміни характеру перехідного процесу та переходу до аварійних пускових режимів роботи. У зв'язку з цим аналіз суміщених електромагнітних та теплових процесів в перетворювальних пристроях є актуальним.

Розглянемо роботу понижуючого широтно-імпульсного перетворювача (ШПІ) з розімкненою системою керування, без зворотного зв'язку, схему якого зображено на рис.1.

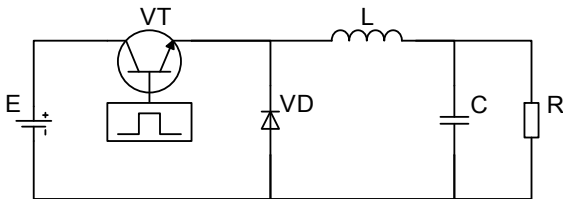


Рис. 1. Понижуючий ШПІ

При дослідженні електромагнітних процесів у ШПІ використаємо RS- моделі транзистора та діода та припущення про миттєве перемикання ключів. Розглянемо вплив температурного режиму роботи на характер перехідних процесів.

Диференційні рівняння системи

Для опису електромагнітних процесів у ШПІ використаємо наступну систему кусочно-безперервних рівнянь [1, 2]

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(t)X(t) + B(t),$$

де $X(t) = \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix}$ - вектор незалежних змінних

(i_L - струм в індуктивності L , u_C - напруга на ємності C ; $A(t)$ - матриця коефіцієнтів; $B(t)$ - вектор зовнішнього впливу.

Для схеми ШПІ зображеної на рис.1, з врахуванням прийнятих моделей ключів, система рівнянь має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{VT} \cdot s + r_{VD} \cdot (1-s) + r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E \cdot s}{L} \\ 0 \end{bmatrix},$$

де r_{VT} , r_{VD} , r_L – опори транзистора, діода та дроселя відповідно; L , C , R – індуктивність дроселя, ємність конденсатора та опір навантаження, E – напруга джерела живлення;

$$s = \begin{cases} 0, \text{ключі: VT-закритий, VD-відкритий,} \\ 1, \text{ключі: VT-відкритий, VD-закритий.} \end{cases}$$

Методом різницевих рівнянь було отримане наступне рішення цієї системи:

$$\begin{bmatrix} I \\ U \end{bmatrix} = e^{A_2(1-(1+\gamma)mT)} \times \left(e^{A_1\gamma mT} \begin{bmatrix} I(mT) \\ U(mT) \end{bmatrix} + A_1^{-1} \left(e^{A_1\gamma mT} - I \right) \begin{bmatrix} E \\ L \\ 0 \end{bmatrix} \right),$$

де матрична експонента до дужок відповідає інтервалу роботи ШПІ із закритим транзистором та відкритим діодом, вираз в дужках є початковими даними даного рівняння, тобто кінцевими даними першої частини періоду з відкритим транзистором та закритим діодом;

I – одинична матриця;

γ – скважність керуючих імпульсів транзистора;

m – номер періоду.

Отримане рішення є загальним і при модифікації моделей ключових та пасивних компонентів може змінюватися. Елементи рішення приймають наступний вигляд:

1. при ігноруванні опорів ключових елементів та дроселя - LC система, $\gamma = const$

$$A_1 = A_2 = \begin{vmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{vmatrix}, A_1^{-1} = \begin{vmatrix} -\frac{L}{R} & C \\ -L & 0 \end{vmatrix};$$

2. при врахуванні опорів ключових елементів та дроселя - RLC система, $\gamma = const$

$$A_1 = \begin{vmatrix} r_{VT} + r_L & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{vmatrix}, A_2 = \begin{vmatrix} r_{VD} + r_L & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{vmatrix}$$

$$A_1^{-1} = \frac{RLC}{r_{VT} + r_L + R} \begin{vmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{r_{VT} + r_L}{L} \end{vmatrix};$$

при врахуванні опорів ключових елементів та дроселя та їх залежності від температури RLC t° система, $\gamma = const$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_0 + L(t^\circ)} = L_0^* + L^*(t^\circ),$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0 + C(t^\circ)} = C_0^* + C^*(t^\circ),$$

$$r_{VT,VD} + r_L = r_{VT,VD0} + r_{L0} + r_{VT,VD}(t^\circ) + r_L(t^\circ),$$

$$A_{1,2} = A_{1,2(0)} + A_{1,2}(t^\circ);$$

при врахуванні зміни скважності керуючих імпульсів $\gamma \neq const$

$$e^{A_1 \gamma m T} = e^{A_1 t_m}, e^{A_2 (1-(1+\gamma)mT)} = e^{A_2 (1-mT-t_m)};$$

де t_m – час перемикання.

Аналіз матричної експоненти

З використанням матричної експоненти знайдемо власні значення матриці (λ). Для цього скористуємося наступним виразом:

$$\det(A - \lambda I) = \begin{vmatrix} -\frac{r_{VT} \cdot s + r_{VD} \cdot (1-s) + r_L}{L} - \lambda & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Нехай $r_{VT} \cdot s + r_{VD} \cdot (1-s) + r_L = r$, тоді:

$$\lambda^2 + \left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC}\right) \cdot \lambda + \frac{1}{LC} \left(\frac{r}{R} + 1\right) = 0.$$

Корені характеристичного рівняння визначаються наступним чином:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC}\right)^2 - \frac{4}{LC} \left(\frac{r}{R} + 1\right)} \right).$$

В пакеті програм *Matlab* корені знаходять за таким алгоритмом. Для початку задається матриця (наприклад матриця A), а корені знаходяться за допомогою функції *eig(A)*. Одинична матриця другого порядку задається як *eye(2)*. Розв'язок диференційного рівняння знаходять за допомогою функції *dsolve*:

$$X = dsolve(diff(i_L) = \dots, diff(u_C) = \dots, i_L(mT) = \dots, u_C(mT) = \dots)$$

Від відношень $\frac{1}{T}$, λ_1 , та λ_2 , залежить більшість характеристик перетворювальних пристроїв [2]. Характер та тривалість перехідного процесу залежать від положення коренів характеристичного рівняння відносно уявної осі. Кут нахилу комплексно-спряжених коренів до уявної осі ϕ розраховується як:

$$tg\phi = \frac{\text{Im}(\lambda)}{\text{Re}(\lambda)},$$

де $\text{Re}(\lambda)$ та $\text{Im}(\lambda)$ реальна та уявна складові коренів, відповідно.

На рис. 2 зображені перехідні характеристики для струму дроселя та напруги на ємності ШПІ при $E = 100\text{В}$, $L = 0,1\text{Гн}$, $C = 0,1\text{мкФ}$, $r = 0,021\text{Ом}$, $R = 1\text{кОм}$, $f = 20\text{кГц}$ ($\phi = 60^\circ$) та температурі 25°С . Дросель виконано з матеріалом магнітопроводу *3С11* [3], для якого при нагріванні від 25°С до 90°С на даній частоті магнітна проникність збільшується на 14% (в режимі слабого поля), В якості конденсатора

фільтру використано алюмінієвий електролітичний конденсатор фірми Epcos [4], для якого при вказаних температурних режимах роботи типова залежність ємності від температури відповідає збільшенню ємності на 11%. Дані графічні залежності були побудовані при розрахунку електромагнітних процесів у ШПП в середовищі *Matlab*.

Були проведені відповідні розрахунки на температурі ємності 90°C. Під час ввімкнення пристрою з нагрітим конденсатором величини стрибків струму та напруги збільшуються, а кут, що характеризує ступінь коливальності процесу зростає до 65°. У разі використання у дроселі магнітного матеріалу в режимі початкового або слабкого намагнічування при зростанні температури магнітна проникність суттєво збільшується [3]. При підвищенні величини індуктивності при нагріві до 0,14 Гн величина кута повертається до попереднього значення $\phi = 60^\circ$, і перехідний процес буде протікати так же само, як і при початковій температурі. При використанні магнітопроводу з невисокою чутливістю до температури, даної компенсації не буде.

При роботі магнітопроводу дроселя з високою напруженістю магнітного поля H , при зростанні температури до 90°C магнітна проникність та індуктивність дроселя суттєво зменшуються. При роботі з граничними значеннями H , величина індуктивності може становити близько 0.07 Гн, значення кута ϕ зростає до 71°, та перехідні процеси мають вигляд, як на рис. 3.

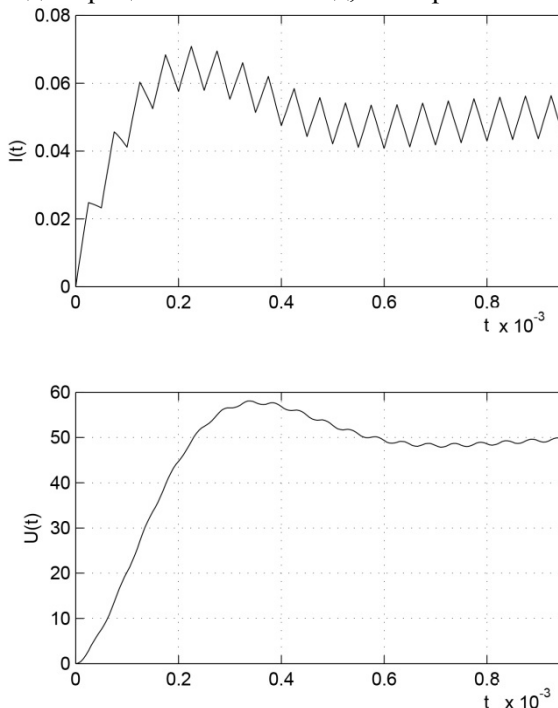


Рис. 2.

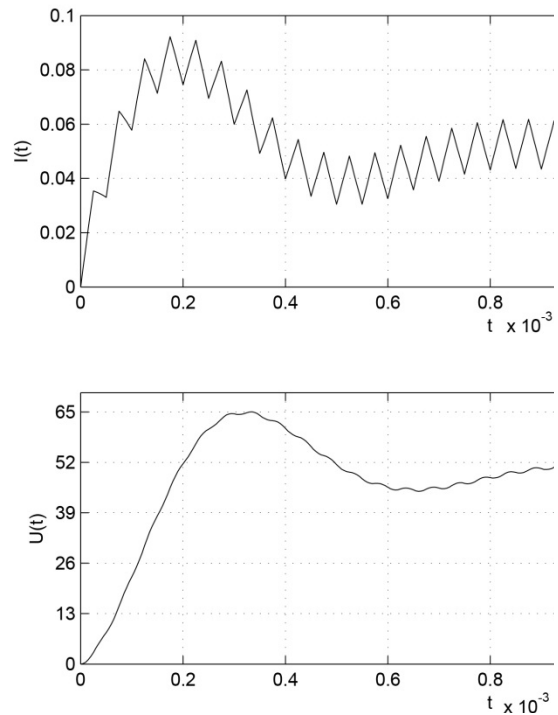


Рис. 3.

Як видно, пікова напруга і струм зростають. В перетворювачах з іншими параметрами пасивних компонентів можуть бути ще вищі скачки з встановленням неприпустимих як пікових, так і установлених режимів роботи, а також зміна самого характеру перехідного процесу з аперіодичного на коливальний.

За рахунок зміни параметрів пасивних компонентів можна змінювати характер перехідного процесу, перетворюючи його в аперіодичний, або навпаки, при великому запасі максимально допустимих параметрів ключових компонентів, довготривалий процес можна трансформувати в швидкий коливальний процес.

У рівнянні $\lambda^2 + b \cdot \lambda + c = 0$ величина b є сумою коренів квадратного рівняння, а c – їх добуток. У разі розташування коренів на комплексній площині, по формулам Вієта можна знайти значення коефіцієнтів, пов'язаних з параметрами пасивних компонентів системи. Чим більше значення коефіцієнта c , тим більше значення дійсної частини коренів, а значить тим швидшим є перехідний процес.

Для зміни типу перехідного процесу за допомогою зовнішнього впливу на компоненти, необхідно вибрати тип перехідного процесу та розрахувати параметри компонентів, вибираючи необхідне для даного типу характеристичне рівняння. Для досягнення даної цілі використовується значення середнього геометричного коренів характеристичного рівняння

$$\Omega = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2},$$

Характеристичне рівняння можна записати як:

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

В даному вигляді величина B характеризує криву перехідного процесу, а Ω – масштаб часу даного процесу $\tau = \Omega \cdot t$.

Висновки

В даній статті на основі проведеного аналізу електромагнітних процесів у понижуючому ШІП розглянуто метод розрахунку перехідних та ustalених режимів роботи з врахуванням

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вентильные преобразователи переменной структуры / Тонкаль В. Е., Руденко В.С., Жуйков В. Я. и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 336 с.
2. Стжелецки Р. Хаотические процессы в системах силовой электроники / Р. Стжелецки, И. Е. Коротеев, В. Я. Жуйков. – Киев: Аверс, 2001. – 197 с.
3. Soft Ferrites. Data Handbook MA01, Philips Components. Netherlands, Philips Electronics, 1996. 887 p.
4. Aluminium Electrolytic Capacitors, TDK. Germany, Epcos AG, 2014. 40 p.

Надійшла до друку 03.02.2016.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

температурного режиму роботи пасивних компонентів.

Проведене моделювання показало можливість виникнення стрибків напруги на ємності та струму в дроселі ШІП та залежність їх амплітуди від температурного режиму роботи.

На підставі проведеного аналізу коренів характеристичного рівняння показана можливість прогнозу загального вигляду перехідних процесів. Розглянута можливість температурної корекції типу перехідних процесів та їх форми. Отримані результати аналізу дозволяють проводити розробку перетворювальних пристроїв з врахуванням можливості виникнення аварійних перехідних режимів експлуатації перетворювальних пристроїв які виникають внаслідок підвищення робочої температури.

REFERENCES

1. Tonkal V.E., Rudenko V.S., Zhujkov V.Y. and oth. *Ventilnye preobrazovateli peremennoj struktury* [Valve converters with variable structure]. Kyiv, Nauk. Dumka, 1989. 336p.
2. Styheletski R., Koroteev I.E., Zhujkov V.Ya. *Haoticheskie process v sistemah silovoj elektroniki* [Chaotic processes in power electronic systems]. Kyiv, Avers, 2001. 197p.
3. Soft Ferrites. Data Handbook MA01, Philips Components. Netherlands, Philips Electronics, 1996. 887p.
4. Aluminium Electrolytic Capacitors, TDK. Germany, Epcos AG, 2014. 40p.

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

Проблема перегріву напівпровідникових перетворювальних пристроїв, які використовуються на залізничному транспорті, є актуальною. Надзвичайно важлива ця проблема для перетворювальних пристроїв, які працюють у ключовому режимі з нестатичним робочим інтервалом. Робота таких перетворювальних пристроїв проходить в постійних пускових перехідних електромагнітних процесах. Характер перехідних процесів та нагрів елементів перетворювачів у такому випадку залежать не лише від поточного навантаження, а і від попередніх режимів роботи. Для розрахунків необхідно аналізувати як перехідні та сталі електромагнітні процеси, так і перехідні теплові процеси, які можуть привести до виникнення аварійних режимів роботи напівпровідникових приладів перетворювачів.

В даній статті на основі аналізу понижуючого ШІП описані розрахунки перехідних і установлених електромагнітних режимів роботи імпульсних перетворювачів з врахуванням температурного режиму роботи пасивних компонентів. Проведений аналіз коренів характеристичного рівняння дозволяє прогнозувати тип перехідного процесу та оперативно проводити корекцію форми характеристик з врахуванням зміни температури.

Результати даного аналізу дозволяють при розробці перетворювальних пристроїв враховувати можливість виникнення аварійних перехідних режимів експлуатації внаслідок нагріву пасивних компонентів.

Ключові слова: ШІП, різниці рівняння, нелінійні системи, характеристичні корені, матрична експонента, перехідні процеси.

УДК 621.314

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

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, м. Киев, 03056, Украина, эл. почта: licornedev@gmail.com,
ORCID: orcid.org/0000-0001-8673-3747

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОНИЖАЮЩЕМ ШИРОТНО ИМПУЛЬСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Проблема перегрева полупроводниковых преобразовательных устройств, используемых на железнодорожном транспорте, является актуальной. Особенно существенна эта проблема для преобразовательных устройств, работающих в ключевом режиме с нестатическим рабочим интервалом. Работа таких устройств проходит в постоянных пусковых переходных электромагнитных процессах. Характер переходных процессов и нагрев элементов преобразователей в таком случае зависят не только от текущей нагрузки, но и от предыдущих режимов работы. Для расчетов данных устройств необходимо анализировать как переходные и статические электромагнитные процессы, так и переходные тепловые процессы, которые могут привести к возникновению аварийных режимов работы полупроводниковых приборов преобразователей.

В данной статье на основе анализа понижающего ШИП описаны расчеты переходных и установившихся электромагнитных режимов работы импульсных преобразователей с учетом температурного режима работы пассивных компонентов. Проведенный анализ корней характеристического уравнения позволяет прогнозировать тип переходного процесса и оперативно проводить коррекцию формы характеристик с учетом изменения температуры.

Результаты данного анализа позволяют при разработке преобразовательных устройств учитывать возможность возникновения аварийных переходных режимов эксплуатации вследствие нагрева пассивных компонентов.

Ключевые слова: ШИП, разностные уравнения, нелинейные системы, характеристические корни, матричная экспонента, переходные процессы.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.314

G. A. BARANYUK, V. A. TODORENKO (NTUU «KPI»)

National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Polytechnic Str., 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: licornedev@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-8673-3747

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN STEP-DOWN PULSE WIDTH CONVERTER TAKING INTO ACCOUNT TEMPERATURE MODE OF OPERATION

The problem of overheating of semiconductor conversion devices used in railway transport, is quite relevant. Of particular significance is the problem of converting devices operating in the key non-static mode operating range. The operation of such devices is held in the permanent starting transient electromagnetic processes. Nature of the transitional process and the heating elements converters in this case depends not only on the current load, but also from the previous modes. For these devices the calculations necessary to analyze both static and transient electromagnetic processes and transient thermal processes, which can lead to accidental modes of semiconductor converters.

In this article, based on the analysis down PWM described calculations transient and steady modes of electromagnetic pulse converters based on the temperature mode of passive components. The analysis of the roots of the characteristic equation allows to predict the type of transition and quickly carry out the correction form characteristics, taking into account changes in temperature.

The results of this analysis allow the development of conversion devices to consider the possibility of emergency transient operating conditions due to the heat of passive components.

Keywords: buck converter, difference equations, nonlinear systems, characteristic root, matrix exponential, transients.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*