

ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ СИНТЕЗУ КОМУТАЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Трубцін К.В., ст. викл., Чуняк Ю.М., асистент, Линдюк Б.В., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Використання електричної енергії в різних областях техніки пов'язано з оптимальними умовами її генерації, передачі та розподілу. Для найбільш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають споживання її з нестандартними параметрами: регульованими частотою та напругою. Тому між джерелом енергії та споживачем необхідні перетворювачі електроенергії. Напівпровідникові прилади великої потужності, які працюють в ключових режимах, мають повну керованість і високу швидкодію, дозволили дискретно керувати потоками електричної енергії великої потужності на підвищених частотах за потрібними законами. Для забезпечення високої якості електричної енергії застосовують різні види імпульсної модуляції. Наявність безлічі міжкомутаційних інтервалів ускладнює вибір оптимальних режимів роботи. Переваги в цьому плані мають спектральні методи моделювання [1, 2], до достоїнств яких відносяться простота процедури зміни алгоритму управління і як наслідок отримання оптимальних, з точки зору якості вихідної напруги, комутаційних (перемикаючих) функцій.

Мета роботи. Розробка спектральних методів моделювання, що дозволяють синтезувати комутаційну функцію перетворювача в аналітичному вигляді, що дозволяє отримати співвідношення між вихідною і живлячою напругою і проводити оптимізацію якості вихідної напруги.

Матеріали і результати досліджень. Функціональна схема силового тракту (Рис. 1) представляє послідовне з'єднання мінімально необхідних функціональних елементів: модулятор (М), амплітудний квантувач (АК) і демодулятор (ДМ).

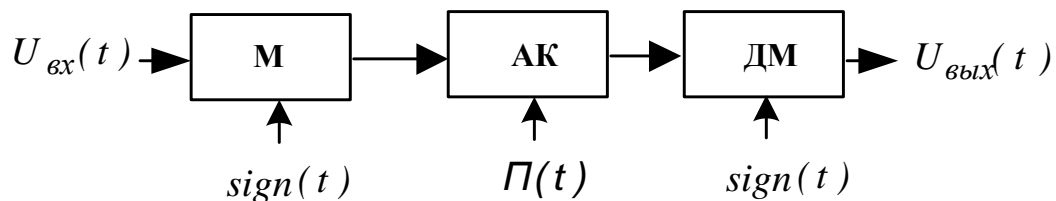


Рисунок 1 – Функціональна схема силового тракту

При формуванні вихідної напруги можна вважати, що перетворювач виконує операцію множення, в результаті якої на виході формується напруга у вигляді:

$$U_{\text{вых}}(t) = \Pi[k(t) \cdot U_{\text{ex}}(t)] = \Pi(t) \cdot U_{\text{ex}}(t), \quad (1)$$

де $k(t)$ – функція, що описує сигнал в ланцюзі управління, $P(t)$ – передавальна функція перетворювача по напрузі.

По відношенню до ланцюга управління такий перетворювач є нелінійною ланкою, а по відношенню до ланцюга силового тракту – параметричною ланкою, тобто лінійною зі змінними в часі параметрами. Вираз (1) є лінійним відносно вхідного впливу $U_{ex}(t)$. Для кожного фіксованого моменту часу, між напрямками $U_{ex}(t)$ і $U_{ввх}(t)$ існує лінійний зв'язок. Параметр, що визначає цей зв'язок, змінюється в часі за законом управління $P[k(t)]$. Метод рішення функціонального рівняння (1) залежить від того, що задано, і що потрібно визначити.

Формування вихідної напруги можна розглядати як процес періодичної модуляції живлючої напруги $U_{ex}(t)$ відповідної періодичної передавальної (надалі комутаційної) функції. Математично це адекватно множенню напруги живлення на комутаційну функцію $P(t)$.

На виході перетворювача формується напруга заданої форми. Для вирішення завдання, треба визначити закон зміни параметра в силовому ланцюзі, який реалізує необхідне перетворення (комутаційну функцію $P(t)$) у вигляді ряду Фур'є.

Функціональне рівняння для силового тракту запишеться у вигляді:

$$U_{ввх}(t) = U_{ex}(t) \cdot \text{sign}(\Omega t) \cdot P(t) \cdot \text{sign}(t). \quad (2)$$

Враховуючи, що $[\text{sign}(\Omega t)]^2 = 1$, вираз (2) набуде вигляду:

$$U_{ввх}(t) = U_{ex}(t) \cdot P(t). \quad (3)$$

Таким чином, завдання синтезу комутаційної функції зводиться до знаходження передавальної функції миттєвих значень напруги, яка визначається відношенням:

$$P(t) = \frac{U_{ввх}(t)}{U_{ex}(t)}. \quad (4)$$

Вирази (1) – (4) описують спрощену структуру силового тракту реалізуються за допомогою функціональних вузлів - суматорів та множників. Всі функціональні вузли є ідеальними, тобто всі операції виконуються миттєво. Така ідеалізація допустима, так як при практичній реалізації в силовому тракті не використовуються енергетичні фільтри.

Для вирішення функціонального рівняння (1) використовується спектрально-поліноміальний метод.

На вхід перетворювача надходить синусоїдальна напруга. Сформулювавши вимоги до форми (спектру) вихідної напруги і з огляду на кількість рівнів апроксимації по амплітуді і часу, запишемо вихідну напругу у вигляді усіченого ряду Фур'є:

$$U_{\text{вих}}(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^N \left[\frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \sum_{m=1}^M b_m \cos(2n-1)\alpha_m \right] \times \cos(2n-1)\omega t, \quad (5)$$

де b_m – амплітуда квантування; α_m – кут квантування; M – кількість ступенів квантування; вираз в квадратних дужках - амплітуда n -ої гармоніки A_n .

Уявімо вихідну напругу у вигляді:

$$U_{\text{вих}}(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2n-1)\omega t. \quad (6)$$

З виразу для вхідної напруги $U_{\text{вх}}(t) = U_m \cos \omega t$, визначимо $t = \arccos \frac{U_{\text{вх}}(t)}{U_m}$.

. Таким чином, шукану характеристику, можна записати:

$$F(U_{\text{вх}}) = \sum_{n=1}^N A_n \left[\cos \left((2n-1) \arccos \frac{U_{\text{вх}}}{U_m} \right) \right] \quad (7)$$

Вирази в квадратних дужках являють собою поліноми Чебишева 1-го роду:

$$\cos \left((2n-1) \arccos \frac{U_{\text{вх}}}{U_m} \right) = T_n \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_m} \right), \text{ які визначаються виразом:}$$

$$T_{n+1}(z) = 2z \cdot T_n(z) - T_{n-1}(z), \quad \text{де } z = \frac{U_{\text{вх}}}{U_m}.$$

Отже, вираз (7) набуде вигляду:

$$F(U_{\text{вх}}) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot T_n(z). \quad (8)$$

Після підстановки виразів для поліномів Чебишева і приведення подібних членів, вираз передавальної функції запишеться у вигляді тригонометричного полінома:

$$F(U_{\text{вх}}) = \sum_{n=1}^N A_{2n-1} \cdot \cos^{(2n-1)} \omega t. \quad (9)$$

Використовуючи формули кратних дуг, перейдемо від тригонометричного степеневому (9) до тригонометричного поліному – усіченому ряду Фур'є:

$$F(U_{ex}) = \sum_{n=1}^N a_{(2n-1)} \cdot \cos(2n-1)\omega t. \quad (10)$$

Вираз (10) є записом ідеальної комутаційної функції, яка однозначно реалізує необхідне перетворення форми і спектра напруги. Слід зазначити, що неможливо перетворити вхідну полігармонійну напругу з частотою ω в напругу з частотами ω/k , де $k > 2$. Таким чином, для реалізації перетворювача понижуючого типу, необхідна полігармонійна напруга живлення на вході.

У перетворювачах з неявно вираженою ланкою постійного струму, напругу живлення можна уявити усіченим рядом :

$$U_n(t) = U_0 + \sum_{i=1}^K U_i \cdot \cos i\omega t. \quad (11)$$

Комутаційну функцію, можна записати у вигляді суми функціональних залежностей, що реалізують необхідне перетворення, для постійної складової U_0 і змінних складових $\sum_{i=1}^K U_i \cdot \cos i\omega t$, напруги живлення (11).

Для постійної складової, комутаційна функція відповідає формі вихідної напруги з урахуванням масштабованого коефіцієнта. Для змінної складової, синтез комутаційної функції проводиться окремо для кожної гармоніки ряду (11). Так для i -ї гармоніки:

$$F(U_{ni}) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot T_n(U_{ni}) \quad (12)$$

Після приведення членів з однаковими степенями, отримаємо степеневі тригонометричні поліноми. Сума функціональних перетворень для кожної гармоніки напруги живлення:

$$F(U_{n\sim}) = \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N A_{in} \cdot T_n(U_{ni}).$$

Підсумуємо члени поліномів з однаковими степенями:

$$F(U_{n\sim}) = \sum_{j=1}^L A_j \cos^j \omega t.$$

Перетворимо степеневий поліном (19) в гармонійний поліном – усічений ряд Фур'є:

$$F(U_{\sim}) = \sum_{j=1}^L a_j \cos j\omega t.$$

Підсумувавши функціональні перетворення для постійної і змінної складових напруги живлення, отримаємо комутаційну функцію:

$$F(U_n) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(2n-1)\omega t + \sum_{j=1}^L a_j \cos j\omega t.$$

Підсумовування тригонометричних поліномів зводиться до підсумовування коефіцієнтів при гармоніках з однаковими частотами. Кількість врахованих гармонік напруги живлення залежить від практичної реалізації силового тракту.

Висновок. Подання вхідних впливів і комутаційної функції у вигляді тригонометричних рядів, дозволяють визначити спектральні характеристики вихідної напруги як добутки і суми синусоїдальних складових з частотами, кратними частоті мережі.

Перелік посилань

1. Сенько В.И., Трубицын К.В. Синтез коммутационных функций полупроводниковых преобразователей. *Технічна електродинаміка*. 2000. № 3. С. 33-36.
2. Макаренко М.П., Сенько В.І., Юрченко М.М. Моделювання мережних перетворювачів модуляційного типу. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. Київ, 2002. С.136-140.