

*к.т.н. Сафронов П.С.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В АСИМЕТРИЧНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

Наведена математична модель напівпровідникового перетворювача при живленні від асиметричної вхідної напруги. Для узагальненої макромоделі знайдено аналітичний вираз вхідних струмів напівпровідникового перетворювача. Представлені результати моделювання багатопульсної перетворювальної системи з міжфазним трансформатором в асиметричному режимі роботи.

Ключові слова: *макромодель, асиметричний режим роботи, багатопульсний напівпровідниковий перетворювач, електронна перетворювальна система.*

Приведена математическая модель полупроводникового преобразователя при питании от асимметричного входного напряжения. Для обобщенной макромодели найдено аналитическое выражение входных токов полупроводникового преобразователя. Представлены результаты моделирования многопульсной преобразовательной системы с межфазным трансформатором в асимметричном режиме работы.

Ключевые слова: *макромодель, асимметричный режим работы, многопульсный полупроводниковый преобразователь, электронная преобразовательная система.*

Напівпровідникові перетворювачі електроенергії споживають енергію на основній частоті напруги мережі живлення та генерують енергію в мережу у вигляді вищих гармонік струму. Зі зростанням кількості електричної енергії, параметри якої перетворюються за допомогою напівпровідникових пристроїв, зростає актуальність поліпшення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів з мережею живлення. Спотворення форми кривої напруги у мережі живлення є слідством несинусоїдальності вхідних струмів напівпровідникових перетворювачів. Проблема генерування вищих гармонік перетворювачами має суттєве техніко-економічне значення при сумірній з мережею живлення потужності електроустановки або сумарній потужності декількох силових перетворювачів електроенергії. Найбільш негативно

впливають на електрообладнання вищі гармоніки нижчих порядків (третья, п'ята, сьома).

В даний час моделювання є основним науково обґрунтованим методом, що використовується для досліджень, оцінок характеристик складних систем і ухвалення рішень у всіх областях наукової і інженерної діяльності. При математичному моделюванні можливе позбавлення впливу зовнішніх чинників, а також точне завдання і варіювання в необмеженому діапазоні параметрів електронної перетворювальної системи.

Аналіз робіт [1, 2] показав, що в даний час для моделювання електронних систем використовуються аналітичні і імітаційні методи. Якнайповніше дослідження процесів при аналітичному моделюванні можна провести, якщо відомі явні зв'язки вихідних характеристик з параметрами, змінними і початковими умовами системи. Для наукового дослідження загальних властивостей об'єкту аналітичним методом проводять спрощення первинної моделі, що дозволяє отримати тільки орієнтовні результати [1]. Імітаційне моделювання дозволяє вирішувати завдання аналізу складніших систем, оскільки імітує елементарні явища із збереженням логічної структури і часової послідовності. Це дозволяє отримувати відомості про процеси, що протікають в певні моменти часу, і оцінювати характеристики досліджуваної системи. Для повного аналізу характеристик процесів в системі проводиться багатократна імітація з варіюванням початкових даних. Комбінування аналітичних і імітаційних методів моделювання дозволяє використовувати їх достоїнства і отримувати ефективніші математичні моделі.

Метою даної роботи є розробка ефективної математичної моделі для дослідження режиму роботи багатопульсної електронної системи при асиметрії напруги живлення.

Матеріал досліджень і отримані результати. Побудова моделі для дослідження впливу асиметрії напруги мережі проводилися для системи, що містить перетворювач з міжфазним трансформатором [3]. Асиметрична напруга мережі описується системою рівнянь

$$\begin{cases} \bar{E}_A = E \cdot N_{AB}; \\ \bar{E}_B = E \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \\ \bar{E}_C = -\bar{E}_A - \bar{E}_B, \end{cases} \quad (1)$$

де N_{AB} – коефіцієнт, що враховує асиметрію напруги;
 E – діюче значення е.р.с. мережі живлення, В.

Струми, що протікають в перетворювачі, визначаються системою рівнянь в матричному вигляді

$$\bar{I} = \bar{T}^{-1} \cdot \bar{U}, \quad (2)$$

де \bar{T} – блокова топологічна матриця;
 \bar{U} – вектор контурних е.р.с.

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j \cdot \omega \cdot L1 & 0 & -j \cdot \omega \cdot M1 \\ 0 & -j \cdot \omega \cdot L1 & j \cdot \omega \cdot L2 & j \cdot \omega \cdot M1 - j \cdot \omega \cdot M2 \\ 0 & -j \cdot \omega \cdot M1 & -j \cdot \omega \cdot M2 & j \cdot \omega \cdot (L3 + L4) + R_d \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де ω – циклічна частота напруги первинного джерела живлення, рад/с;

$L1, L3, L2, L4$ – індуктивності обмоток міжфазного трансформатора, Гн;

$M1, M2$ – взаємні індуктивності первинних і вторинних обмоток міжфазного трансформатора, Гн.

$$\bar{U} = [0; \bar{E}_1; \bar{E}_1; 0], \quad (4)$$

де \bar{E}_1, \bar{E}_2 – комплексні значення контурних е.р.с.

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_A \cdot S2 + \bar{E}_B \cdot S5 + \bar{E}_C \cdot S8 - (\bar{E}_A \cdot S1 + \bar{E}_B \cdot S4 + \bar{E}_C \cdot S7), \quad (5)$$

$$\bar{E}_2 = \bar{E}_A \cdot S3 + \bar{E}_B \cdot S6 + \bar{E}_C \cdot S9 - (\bar{E}_A \cdot S2 + \bar{E}_B \cdot S5 + \bar{E}_C \cdot S8), \quad (6)$$

де $S1 - S9$ – комутаційні функції, що описують стани ключів.

Миттєве значення струму, що протікає в навантаженні, визначається наступним виразом:

$$i_d(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \left| \operatorname{Re}(\dot{I}_4(\omega \cdot t)) \cdot \sin(\omega \cdot t) + \operatorname{Im}(\dot{I}_4(\omega \cdot t)) \cdot \cos(\omega \cdot t) \right|. \quad (7)$$

Фазні струми перетворювача визначаються системою

$$\begin{cases} \bar{I}_A = \bar{I}_1 \cdot S1 + \bar{I}_2 \cdot S2 + \bar{I}_3 \cdot S3; \\ \bar{I}_B = \bar{I}_1 \cdot S4 + \bar{I}_2 \cdot S5 + \bar{I}_3 \cdot S6; \\ \bar{I}_C = \bar{I}_1 \cdot S7 + \bar{I}_2 \cdot S8 + \bar{I}_3 \cdot S9. \end{cases} \quad (8)$$

Електронні перетворювальні системи можуть бути проаналізовані на рівні моделей окремих компонентів, тобто на мікрорівні. В цьому випадку можливе отримання різноманітних характеристик (струмів і напруг будь-якого елемента системи). Але у багатьох випадках інтерес викликають лише вхідні і вихідні величини досліджуваної системи. В цьому випадку найзручніше використовувати макромоделі, що забезпечують достатньо повний опис процесів, що протікають на вході і виході перетворювальної системи. Використання макромоделей дозволяє значно спростити аналіз впливу певної групи параметрів на ті або інші енергетичні і часові характеристики.

На рисунку 1 наведена макромодель багатопульсного перетворювача напруги, що містить в своїй структурі міжфазний трансформатор [3 – 5].

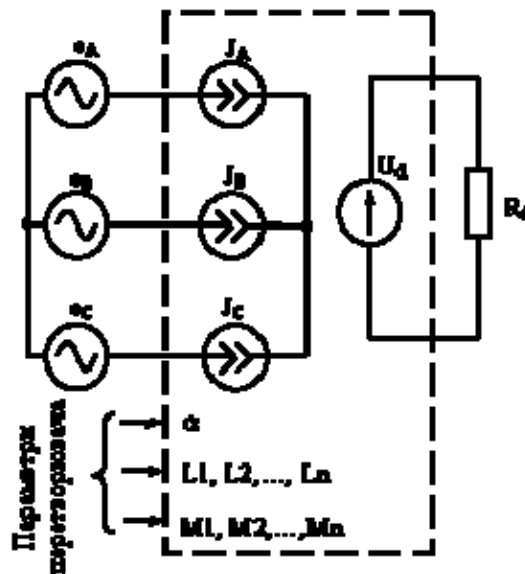


Рисунок 1 – Макромодель багатопульсного перетворювача напруги

Вхідні струми моделюються за допомогою керованих джерел струму J_A, J_B, J_C , вихідна напруга – за допомогою залежного джерела е.р.с. U_d . При цьому фазні струми для несиметричного режиму роботи визначатимуться аналітичним виразом

$$\begin{aligned}
i_{\phi} = & \sum_{n_I=1}^{\frac{m_2}{4}} \left[I_m \cos \left(\frac{\pi}{m_2} + \frac{2\pi}{m_2} \left(\frac{m_2}{4} - n_I \right) \right) \times \right. \\
& \times \sin \left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{m_2} + \frac{2\pi}{m_2} \left(\frac{m_2}{4} - n_I \right) \right) \times \\
& \left. \times \left(h \left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{m_2} (n_I - 1) - \alpha + \theta \right) - h \left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{m_2} \cdot n_I - \alpha + \theta \right) \right) \right],
\end{aligned} \tag{9}$$

де I_m – амплітуда фазного струму;
 m_2 – пульсність перетворювача;
 ω – циклічна частота мережі живлення;
 t – час;
 h – одинична функція;
 α – кут регулювання вентилів перетворювача;
 n_I – номер ступеня струму фази перетворювача на інтервалі першої чверті періоду;
 n_{II} – номер ступеня струму фаз перетворювача на інтервалі другої чверті періоду;
 θ – кут асиметрії.

На рисунку 2 наведені часові діаграми фазних струмів напівпровідникового багатопульсного перетворювача.

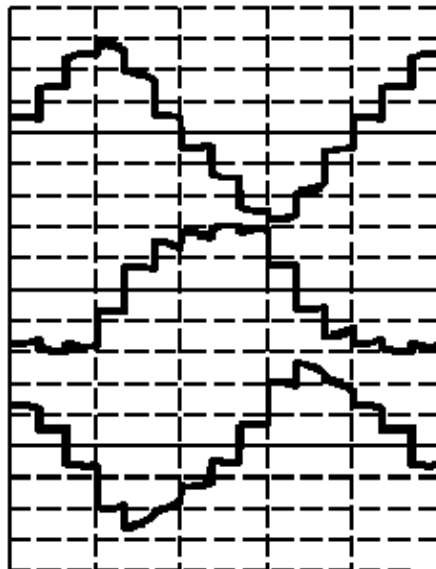


Рисунок 2 – Часові діаграми фазних струмів напівпровідникового перетворювача

На рисунку 3 наведена часова діаграма вихідної напруги в масштабі 100 В / под. і 5 мс / под.

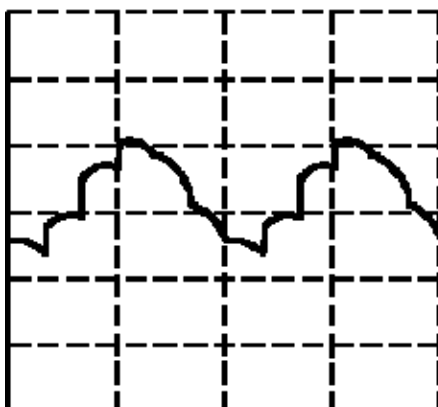


Рисунок 3 – Часова діаграма вихідної напруги

Отримана макромодель багатопульсної електронної перетворювальної системи, що дозволяє досліджувати асиметричний режим роботи. Комбінування аналітичних і імітаційних методів дозволило підвищити ефективність моделі за рахунок виключення з моделі параметрів, що незначною мірою впливають на форму струму. Результати моделювання дозволяють провести оцінку ступеня впливу асиметрії вхідної напруги електронної перетворювальної системи на асиметрію струмів напівпровідникового перетворювача.

Бібліографічний список

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1988. – 421 с.
3. Сафронов П.С. Покращення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів з мережею за допомогою міжфазного енергообміну: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.09.12 «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії» / П.С. Сафронов. – Х., 2006. – 18 с.
4. Сафронов П.С. Влияние асимметрии напряжения сети на форму входных токов полупроводникового преобразователя с межфазным трансформатором / П.С. Сафронов, Ю.Э. Паэранд // Технічна електродинаміка. – К., 2007. – Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність, ч. 5. – С. 19-22.
5. Сафронов П.С. Аналитико-имитационное моделирование комбинированной электронной системы с применением современных ин-

*формационных технологий / П.С. Сафронов, Ю.Э. Паэранд, М.П. Лынь
// Сборник научных трудов Донбасского государственного технического
университета. – Алчевск, 2007. – Вып. 23. – С. 368-374.*

Рекомендована к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э