

*Е.Ю. Паеранд, Донбаський державний технічний університет*

*П.С. Сафронов, Донбаський державний технічний університет*

*М.П. Линь, Донбаський державний технічний університет*

## **ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ**

Паеранд Е.Ю., Сафронов П.С., Линь М.П.

Використання сучасних інформаційних технологій при моделюванні комбінованої електронної системи

Запропонована аналітико-імітаційна модель комбінованої електронної системи з високою адекватністю. Отримано рішення в загальному вигляді для вихідних характеристик напівпровідникового перетворювача. Наведено результати математичного моделювання системи, що дозволили визначити сферу максимальної електромагнітної сумісності перетворювача з мережею та оцінити вплив збурення по керуванню.

*Ключові слова:* математичне моделювання, аналітико-імітаційна модель, декомпозиція процесів, мікропроцесор, напівпровідниковий перетворювач.

Паэранд Э. Ю., Сафронов П.С., Линь М.П.

Использование современных информационных технологий при моделировании комбинированной электронной системы

Предложена аналитико-имитационная модель комбинированной электронной системы с высокой адекватностью. Получено решение в общем виде для выходных характеристик полупроводникового преобразователя. Приведены результаты математического моделирования системы, позволившие определить область максимальной электромагнитной совместимости преобразователя с сетью и оценить влияние возмущающего воздействия по управлению.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, аналитико-имитационная модель, декомпозиция процессов, микропроцессор, полупроводниковый преобразователь.

Зараз моделювання є основним науково обґрунтованим методом, що використовується для досліджень, оцінок характеристик складних систем і ухвалення рішень у всіх галузях наукової та інженерної діяльності. Розроблені

й проєктовані системи можна ефективно досліджувати аналітичним та імітаційним моделюванням, за допомогою сучасних інформаційних технологій, що реалізуються на ЕОМ. Одним з основних напрямів розвитку інформаційних технологій у проєктуванні електронних систем є розробка й використання в САПР математичних моделей, що можуть служити для прогнозування процесів у досліджуваних об'єктах.

Аналіз праць [1; 2] показав, що сьогодні для моделювання електронних систем використовуються аналітичні й імітаційні методи. Якнайповніше дослідження процесів при аналітичному моделюванні можна провести, якщо відомі явні зв'язки вихідних характеристик з параметрами й початковими умовами системи. Такі залежності часто вдається одержати тільки для порівняно простих систем. Тому для наукового дослідження загальних властивостей об'єкту аналітичним методом проводять спрощення первинної моделі, що дозволяє одержати тільки приблизні результати [1].

Імітаційне моделювання дозволяє вирішувати завдання аналізу складніших систем, оскільки імітує елементарні явища зі збереженням логічної структури й послідовності в часі. Це дозволяє одержувати відомості про процеси, що мають місце в певні моменти часу, й оцінювати характеристики досліджуваної системи. Проте при реалізації імітаційного моделювання за допомогою сучасних інформаційних технологій рішення завжди носить не загальний характер, оскільки воно відповідає фіксованим параметрам системи, початковим умовам і зовнішнім діям [2; 3]. Тому для повного аналізу характеристик процесів у системі проводиться багатократна імітація з варіюванням початкових даних. При цьому виникає збільшення витрат машинного часу й пам'яті. Комбінування аналітичних та імітаційних методів моделювання дозволяє використовувати їх переваги й одержувати більш ефективні математичні моделі.

Завданням цієї роботи є розробка ефективної математичної моделі системи «інерційний об'єкт управління – швидкодійна система управління» без

істотного зниження адекватності моделі за допомогою комбінування аналітичного й імітаційного методів моделювання.

Для побудови аналітико-імітаційної (комбінованої) моделі доцільно провести попередню декомпозицію процесів, що протікають у системі. Як об'єкт управління в роботі розглядається напівпровідниковий перетворювач, як система управління – мікропроцесорна система, що знаходиться в замкнутому контурі з об'єктом управління, зовнішніми (задаючими) сигналами й сигналами зворотних зв'язків. Постійні часу перетворювача й мікропроцесорної системи відрізняються один від одного на кілька порядків. Отже, спільне імітаційне моделювання двох цих підсистем викличе значні витрати машинного часу. У той же час отримання аналітичного опису функціонування мікропроцесорної системи можливе тільки при ухваленні припущень і спрощень, що істотно знижують точність відображення процесів, які виникають при взаємному впливі цих двох підсистем одна на одну [4], тоді як через значну інерційність об'єкта управління можна прийняти допущення про квазістатичність процесів, що протікають у напівпровідниковому перетворювачі. Таким чином, для підсистеми „об'єкт управління” доцільно використовувати аналітичну аналогово-дискретну модель, а для підсистеми „система управління” – імітаційну цифрову модель.

Зовнішні вхідні сигнали об'єкта управління описуються симетричною системою

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

де  $E$  – діюче значення е.р.с. первинного джерела живлення.

Квазістатичний режим роботи напівпровідникового перетворювача з трансформаторними зв'язками може бути описаний системою комплексних рівнянь [5]

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0; \\ \dot{I}_2 \cdot j\omega \cdot L1 - \dot{I}_4 j\omega \cdot M1 = \dot{E}_1; \\ -\dot{I}_2 \cdot j\omega \cdot L1 + \dot{I}_3 \cdot j\omega \cdot L2 + \dot{I}_4 \cdot (j\omega \cdot M1 - j\omega \cdot M2) = \dot{E}_2; \\ -\dot{I}_2 \cdot j\omega \cdot M1 - \dot{I}_3 \cdot j\omega \cdot M2 + \dot{I}_4 \cdot (j\omega \cdot L3 + j\omega \cdot L4 + R) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\omega$  – циклічна частота напруги первинного джерела живлення;

$L1-L4$ ,  $M1$ ,  $M2$ ,  $R$  – внутрішні параметри об'єкту управління (перетворювача);

$\dot{E}_1$ ,  $\dot{E}_2$  – комплексні значення сумарних контурних е.р.с.

Для опису дії системи управління на об'єкт управління ввели в математичну модель комутаційні функції, формуючі контурні е.р.с. з симетричної системи вхідних е.р.с. і таких, що описують управління перетворювачем мікропроцесорної системи

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_A \cdot S2 + \dot{E}_B \cdot S5 + \dot{E}_C \cdot S8 - (\dot{E}_A \cdot S1 + \dot{E}_B \cdot S4 + \dot{E}_C \cdot S7). \quad (3)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_A \cdot S3 + \dot{E}_B \cdot S6 + \dot{E}_C \cdot S9 - (\dot{E}_A \cdot S2 + \dot{E}_B \cdot S5 + \dot{E}_C \cdot S8), \quad (4)$$

де  $S1 - S9$  – комутаційні функції, що враховують вплив системи управління на об'єкт управління.

Кількість комутаційних функцій визначається видом напівпровідникового перетворювача. У роботі розглянуто окремий випадок уживання перетворювача з чотирьохобмотувальним міжфазним трансформатором і можливістю шестикратною зміни внутрішньої структури, для чого достатнє використання дев'яти комутаційних функцій [5]. Комутаційні функції описуються виразами (5) – (13), у невказаних інтервалах комутаційні функції приймають нульове значення.

$$S1 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \frac{\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n; \frac{2\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (5)$$

де  $n = -1, 0, 1, \dots$ ;

$\alpha$  – кут управління перетворювачем.

$$S2 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \frac{\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n; \frac{\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n \right) \cup \left[ \frac{2\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n; \frac{5\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (6)$$

$$S3 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \alpha + \pi \cdot n; \frac{\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n \right) \cup \left[ \frac{5\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n; \pi + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (7)$$

$$S4 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \alpha + \pi \cdot n; \frac{\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (8)$$

$$S5 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \frac{\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n; \frac{\pi}{2} + \alpha + \pi \cdot n \right) \cup \left[ \frac{5\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n; \pi + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (9)$$

$$S6 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \frac{\pi}{2} + \alpha + \pi \cdot n; \frac{5\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (10)$$

$$S7 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \frac{2\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n; \pi + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (11)$$

$$S8 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \alpha + \pi \cdot n; \frac{\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n \right) \cup \left[ \frac{\pi}{2} + \alpha + \pi \cdot n; \frac{2\pi}{3} + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (12)$$

$$S9 = 1, \omega \cdot t \in \left[ \frac{\pi}{6} + \alpha + \pi \cdot n; \frac{\pi}{2} + \alpha + \pi \cdot n \right) \quad (13)$$

Рішення системи рівнянь (2) дозволяє одержати вирази для вихідних змінних електронної системи

$$i_d(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \left| \operatorname{Re}(\dot{I}_4(\omega \cdot t)) \cdot \sin(\omega \cdot t) + \operatorname{Im}(\dot{I}_4(\omega \cdot t)) \cdot \cos(\omega \cdot t) \right| \quad (14)$$

$$U_d = \frac{3}{\pi} \sum_{n=0}^1 B_n \cdot \left[ \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}n + \theta_n\right) - \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6}n + \theta_n\right) \right], \quad (15)$$

$$B_n = \left| \dot{I}_4\left(\alpha + \frac{\pi}{6}n\right) \right|; \quad (16)$$

$$\theta_n = \arg\left(\dot{I}_4\left(\alpha + \frac{\pi}{6}n\right)\right). \quad (17)$$

При моделюванні комбінованої (аналогово-цифрової) електронної системи визначалася електромагнітна сумісність напівпровідникового перетворювача. Як критерій оцінки був прийнятий коефіцієнт несинусоїдальності вхідного струму перетворювача. Система трифазних вхідних струмів описується виразом (18).

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_1 \cdot S1 + \dot{I}_2 \cdot S2 + \dot{I}_3 \cdot S3; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_1 \cdot S4 + \dot{I}_2 \cdot S5 + \dot{I}_3 \cdot S6; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_1 \cdot S7 + \dot{I}_2 \cdot S8 + \dot{I}_3 \cdot S9. \end{cases} \quad (18)$$

Запропонована математична аналітико-імітаційна модель була використана при моделюванні цифро-аналогової електронної системи в пакеті наскрізного проектування OrCAD 9.2 і пакеті візуального моделювання Simulink / MatLab 6.1.

У результаті моделювання одержана область максимальної електромагнітної сумісності перетворювача з мережею живлення при варіації параметрів електронної системи, що наведена на рис. 1.

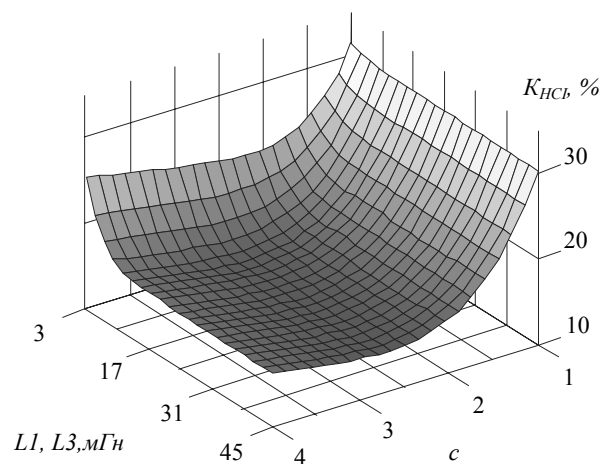


Рис.1. Залежність коефіцієнта несинусоїдальності вхідного струму від параметрів електронної системи

Залежність на рис. 2 ілюструє вплив збурюючої дії по управлінню на електромагнітну сумісність перетворювача з мережею.

Аналітико-імітаційне моделювання аналогово-цифрової електронної системи дозволило одержати математичну модель з високою адекватністю. Відхилення одержаних результатів від результатів імітаційного моделювання не перевищує 1%. Виділення об'єкта управління в аналітичну субмодель дозволило одержати характеристики об'єкта в загальному вигляді. Виділення системи управління в імітаційну субмодель дозволило врахувати дискретність і вплив збурюючих дій.

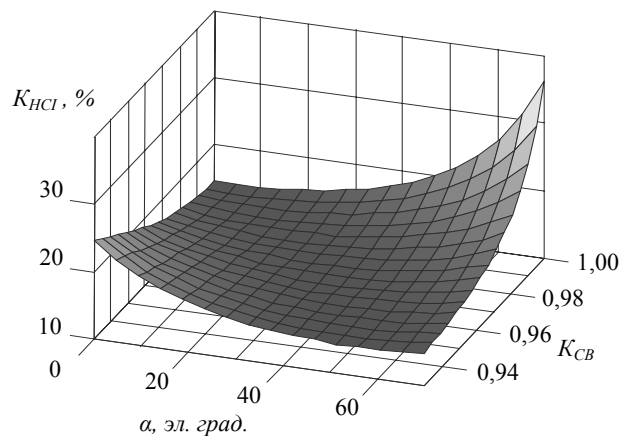


Рис. 2. Залежність коефіцієнта несинусоїдальності вхідного струму від параметрів управління

Подальші дослідження слід спрямувати на моделювання комутаційних процесів у перетворювачі й вивчення впливу збурюючих асиметруючих чинників на електромагнітну сумісність перетворювача.

### Література

1. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем. – М. : Высш. шк., 2005. – 343 с.
2. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. – М. : Наука, 1988. – 421 с.
3. **Макаренко М.П.** Особливості математичного забезпечення системного моделювання електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії умовними рівняннями // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 4. – С. 11–15.

4. **Алтунин Б.Ю.** Структурное моделирование многофазных регулируемых преобразовательных агрегатов // Технічна електродинаміка. – К., 2000. – Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 7. – С. 37–40.

5. **Сафронов П.С.** Покращення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів з мережею за допомогою міжфазного енергообміну : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.12 / Нац. техн. ун-т “ХПІ”. – Х., 2006. – 18 с.

Paerand U.E., Safronov P.S., Lin M.P.

Use of modern information technologies at the design of the combined electronic system

The analytical-simulation model of the mixed electronic system is offered with the high adequacy. A decision in a general view for descriptions of outputs characteristics of semiconductor converter is shown. The results of mathematical simulation of system allowed to define the area of maximal electromagnetic compatibility of converter with a network and estimate influencing of control revolting influence.