

*Канд. техн. наук, профессор Паэранд Ю.Э.,
канд. техн. наук Сафронов П.С.,
бакалавр Лынь М.П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

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

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В настоящее время моделирование является основным научно обоснованным методом, используемым для исследований, оценок характеристик сложных систем и принятия решений во всех областях научной и инженерной деятельности. Разработанные и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью аналитических и имитационных математических моделей, посредством применения современных информационных технологий, реализуемых на ЭВМ. Одним из основных направлений развития информационных технологий в проектировании электронных систем является разработка и использование в САПР математических моделей, которые могут служить для прогнозирования процессов в исследуемых объектах.

Анализ исследований и публикаций.

Анализ работ [1, 2] показал, что в настоящее время для моделирования электронных систем используются аналитические и имитационные методы. Наиболее полное исследование процессов при аналитическом моделировании можно провести, если известны явные связи выходных характеристик с параметрами и начальными условиями системы. Такие зависимости зачастую удается получить только для сравнительно простых систем. Поэтому для научного исследования общих

свойств объекта аналитическим методом производят упрощение первоначальной модели, что позволяет получить только приближенные результаты [1].

Имитационное моделирование позволяет решать задачи анализа более сложных систем, так как имитирует элементарные явления с сохранением логической структуры и временной последовательности. Это позволяет получать сведения о протекающих процессах в определенные моменты времени и оценивать характеристики исследуемой системы. Однако при реализации имитационного моделирования с помощью современных информационных технологий решение всегда носит частный характер, так как оно соответствует фиксированным параметрам системы, начальным условиям и внешним воздействиям [2, 3]. Поэтому для полного анализа характеристик процессов в системе производится многократная имитация с варьированием исходных данных. При этом возникает увеличение затрат машинного времени и памяти. Комбинирование аналитических и имитационных методов моделирования позволяет использовать их достоинства и получать более эффективные математические модели.

Постановка задачи.

Задачей данной работы является разработка эффективной математической модели системы «инерционный объект управления - быстродействующая система управления» без существенного снижения адекватности модели посредством комбинирования аналитического и имитационного методов моделирования.

Изложение материала и полученные результаты.

Для построения аналитико-имитационной (комбинированной) модели целесообразно провести предварительную декомпозицию процессов протекающих в системе. В качестве объекта управления в работе рассматривается полупроводниковый преобразователь, в качестве системы управления – микропроцессорная система, находящаяся в замкнутом контуре с объектом управления, внешними (задающими) сигналами и сигналами обратных связей. Постоянные времени преобразователя и микропроцессорной системы отличаются друг от друга на несколько порядков. Следовательно, совместное имитационное моделирование двух этих подсистем вызовет значительные затраты машинного времени. В то же время получение аналитического описания функционирования микропроцессорной системы возможно только при принятии допущений и упрощений, существенно снижающих точность отображения процессов, возникающих при взаимном влиянии этих двух подсистем друг на друга [4]. Тогда как из-за значительной инерционности объекта управления можно принять допущение о квазистатичности процессов, протекающих в полупроводнике преобразователя. Таким образом, для подсистемы «объект управления» целесообразно использовать аналити-

ческую аналогово-дискретную модель, а для подсистемы «система управления» – имитационную цифровую модель.

Внешние входные сигналы объекта управления описываются симметричной системой

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

где E – действующее значения э.д.с. первичного источника питания.

Квазистатический режим работы полупроводникового преобразователя с трансформаторными связями может быть описан системой комплексных уравнений [5]

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

где ω – циклическая частота напряжения первичного источника питания;

$L1-L4, M1, M2, R$ – внутренние параметры объекта управления (преобразователя);

\dot{E}_1, \dot{E}_2 – комплексные значения суммарных контурных э.д.с.

Для описания воздействия системы управления на объект управления введем в математическую модель коммутационные функции, формирующие контурные э.д.с. из симметричной системы входных э.д.с. и описывающие управление преобразователем микропроцессорной системы

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

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

где $S1 - S9$ – коммутационные функции, учитывающие влияние системы управления на объект управления.

Количество коммутационных функций определяется видом полупроводникового преобразователя. В работе рассмотрен частный случай

применения преобразователя с четырехобмоточным межфазным трансформатором и возможностью шестикратного изменения внутренней структуры, для чего достаточно использования девяти коммутационных функций [5]. Коммутационные функции описываются выражениями (5) – (13), в неуказанных интервалах коммутационные функции принимают нулевое значение.

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

где $n = -1, 0, 1, \dots$;

α – угол управления преобразователем.

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

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

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

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

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

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

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

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

Решение системы уравнений (2) позволяет получить выражения для выходных переменных электронной системы

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

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

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

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

При моделировании комбинированной (аналогово-цифровой) электронной системы определялась электромагнитная совместимость полупроводникового преобразователя. В качестве критерия оценки был принят коэффициент несинусоидальности входного тока преобразователя. Система трехфазных входных токов описывается выражением (18).

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

Предложенная математическая аналитико-имитационная модель была использована при моделировании цифро-аналоговой электронной системы в пакете сквозного проектирования OrCAD 9.2 и пакете визуального моделирования Simulink / MatLab 6.1.

В результате моделирования получена область максимальной электромагнитной совместимости преобразователя с сетью питания при вариации параметров электронной системы, приведенная на рис. 1.

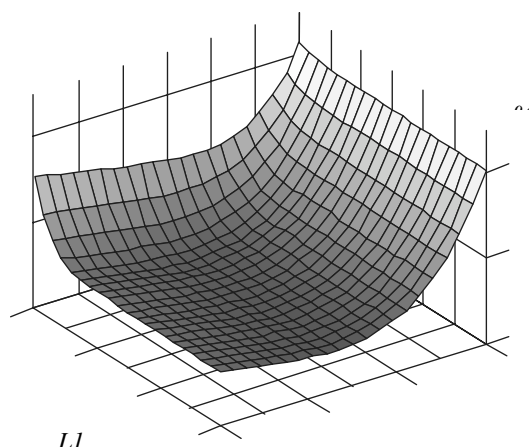
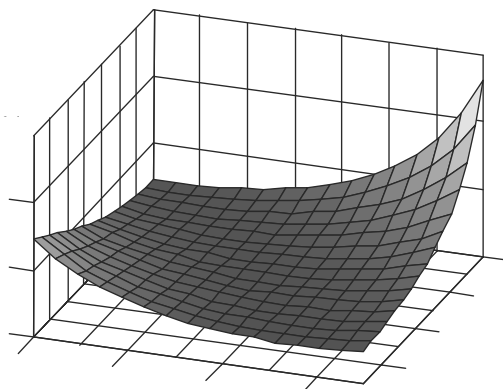


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента несинусоидальности входного тока от параметров электронной системы

Зависимость на рис. 2 иллюстрирует влияние возмущающего воздействия по управлению на электромагнитную совместимость преобразователя с сетью.



а.

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента несинусоидальности входного тока от параметров управления

Выводы и направление дальнейших исследований.

Аналитико-имитационное моделирование аналогово-цифровой электронной системы позволило получить математическую модель с высокой адекватностью. Отклонение полученных результатов с результатами имитационного моделирования не превышает 1%. Выделение объекта управления в аналитическую подмодель позволило получить характеристики объекта в общем виде. Выделение системы управления в имитационную подмодель позволило учесть дискретность и влияние возмущающих воздействий.

Дальнейшие исследования следует направить на моделирование коммутационных процессов в преобразователе и изучение влияния возмущающих асимметрирующих факторов на электромагнитную совместимость преобразователя.

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.

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.

Библиографический список.

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. – К., 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”, – Харків, 2006. – 18 с.