

УДК 621.314.6

ВІЗУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА**О.Г. Алексєєв***, канд. техн. наук, **Д.Г. Алексієвський****, канд. техн. наук,
К.О. Туришев***, **С.Л. Шмалій******, канд. техн. наук, **О.О. Панкова*******Запорізька державна інженерна академія,
пр. Соборний, 226, Запоріжжя, 69006, Україна
e-mail: lasian2017@ukr.net

Розглянуто питання побудови та використання математичної моделі тиристорного однофазного мостового випрямляча засобами візуального моделювання. На відміну від моделювання на схемотехнічному рівні запропонована математична модель має значно більшу швидкодію, що дає змогу скоротити час моделювання складних електротехнічних комплексів, до складу яких входить тиристорний випрямляч. Запропонована реалізація математичної моделі випрямляча описує його роботу як у режимі безперервного струму, так і у режимі переривчастого. Розглянуто питання адекватності запропонованої математичної моделі шляхом порівняння результатів моделювання, отриманих за її допомогою, та результатів моделювання, що були отримані за допомогою схемотехнічної моделі. Досліджено вплив кута керування на величину похибки, що виникає у разі моделювання пускового режиму випрямляча. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: математична модель, тиристорний однофазний мостовий випрямляч, візуальне моделювання, схемотехнічна модель.

Аналіз проблеми та постановка завдання. У разі моделювання складних електротехнічних комплексів їх розробник може стикатися з проблемою значного збільшення часу на моделювання внаслідок наявності у математичній моделі сукупності паралельних процесів зі значною різницею у постійних часу. Більш високочастотним компонентом моделі зазвичай є напівпровідникові ключі, що входять до складу напівпровідникових перетворювачів електричної енергії, а низькочастотними компонентами – механічні, теплові та інші процеси з великою постійною часу.

Подолання цієї проблеми можливо у разі застосування більш швидкодіючих моделей компонентів з більш швидкими процесами.

Одним з таких компонентів є однофазний керований мостовий випрямляч. Побудову його математичної моделі розглянемо у цій роботі. Вона виконана засобами візуального моделювання, що дає змогу наявно представити причинно-наслідкові зв'язки у системі.

Слід зазначити, що запропонована математична модель описує роботу випрямляча як у режимі безперервного, так і у режимі переривчастого струму, оскільки у разі протікання перехідних процесів можуть виникати випадки перебування випрямляча у зоні переривчастого струму.

Для застосування запропонованої моделі також постає важливе питання ступеня її адекватності. Він може бути визначений шляхом порівняння роботи цієї моделі з моделюванням, отриманим за допомогою моделі, побудованої на схемотехнічному рівні.

Мета роботи – розробка спрощеної математичної моделі однофазного мостового тиристорного випрямляча з використанням мови візуального моделювання та визначення її адекватності шляхом порівняння з моделлю, що побудована засобами схемотехнічного моделювання.

Аналіз публікацій. Питанням моделювання напівпровідникових перетворювачів у складі електротехнічного комплексу присвячено досить багато робіт. До них можна віднести [1–3]. Поширеним підходом до побудови математичної моделі є її реалізація на схемотехнічному рівні. У роботі [4] запропоновано методика побудови математичної моделі електротехнічного комплексу, яка базується на поданні системи у формі структури енергетичного тракту, з використанням бібліотеки компонентів енергетичного тракту. Формулюється завдання

створення такої бібліотеки. Основні співвідношення для опису характеристик тиристорних випрямлячів наводяться у [5, 6].

Результати досліджень. У разі розгляду моделі випрямляча за параметри стану моделі були взяті усереднені значення електричних величин за період зміни напруги живлення. Розглянемо роботу в режимі з активно-індуктивним навантаженням (рис. 1).

Середнє значення напруги на виході випрямляча визначається за формулою

$$U_d(t) = 0,45 \cdot U \cdot (\cos(\alpha_1(t)) + \cos(\beta_1(t))) - 2 \cdot U_{VS_on} - 2 \cdot I_d \cdot R_{VS_on}, \quad (1)$$

де U – діюче значення напруги на вході випрямляча; α_1 – фактичний кут моменту включення вентиля; β_1 – кут відкритого стану вентиля при зворотній полярності вхідної напруги; U_{VS_on} – пряме падіння напруги на вентилях; R_{VS_on} – диференціальний опір вентиля у відкритому стані; I_d – середнє значення струму на виході випрямляча.

Значення $\cos(\alpha_1(t))$ визначається за допомогою виразу

$$\cos(\alpha_1(t)) = \cos(\alpha(t)) - \frac{2\sqrt{2} \cdot I_d(t) \cdot \pi \cdot f_c \cdot L_a}{U}, \quad (2)$$

де α – кут керування; L_a – еквівалентна індуктивність вхідного кола; f_c – частота вхідної напруги.

Кут β_1 визначається за допомогою виразу

$$\beta_1(t) = \begin{cases} \alpha & \text{якщо } \left[\arctg\left(\frac{2\pi \cdot f_c \cdot L_d \cdot I_d(t)}{U_n}\right) - \alpha \right] \geq 0 \\ \arctg\left(\frac{2\pi \cdot f_c \cdot L_d \cdot I_d(t)}{U_n}\right) & \text{якщо } \left[\arctg\left(\frac{2\pi \cdot f_c \cdot L_d \cdot I_d(t)}{U_n}\right) - \alpha \right] < 0, \end{cases} \quad (3)$$

де U_n – напруга на виході індуктивного фільтра; L_d – індуктивність фільтра.

Вираз (3) враховує як режим безперервного, так і переривчастого струму випрямляча. Введемо позначення вхідних та вихідних змінних відповідно до системи позначень, що була запропонована у [1]: $\alpha \Rightarrow \alpha$, $U \Rightarrow U_+$, $U_n \Rightarrow U_-$, $I_d \Rightarrow I_-$, $U_d \Rightarrow U_-$. Візуальна модель однофазного мостового тиристорного випрямляча (а) та його позначення як елемента візуально-блочної моделі (б) [1] наведені на рис. 2.

Для підтвердження працездатності запропонованої моделі у роботі було проведено порівняльне моделювання однофазного мостового випрямляча за допомогою схемотехнічної та запропонованої моделей.

Візуально-блочна модель з використанням моделі випрямляча як елемента бібліотеки елементів [4] наведена на рис. 3. Результати моделювання за двома альтернативними моделями при зміні кута керування наведені на рис. 4. Хвиляста крива напруги відповідає схе-

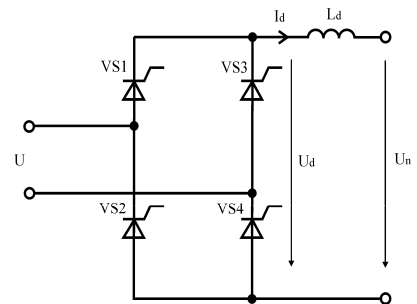


Рис. 1

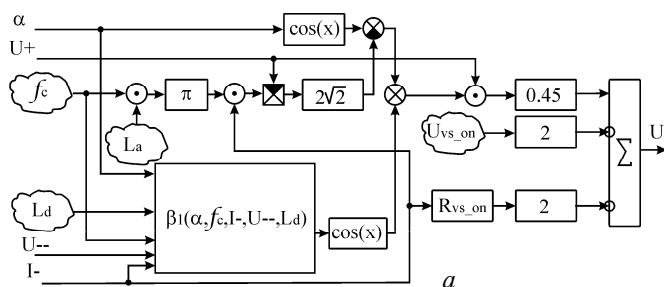


Рис. 2

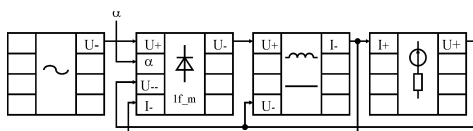


Рис. 3

мотехнічній моделі, а гладка – візуальній моделі випрямляча.

На другому інтервалі зміни кута керування можна бачити режим переривчастого струму випрямляча, який,

як і безперервний режим, достатньо адекватно відтворюється у запропонованій моделі.

Порівняння часу моделювання запропонованої та схематехнічної моделей виявило скорочення часу на виконання розрахунків у середньому в 27 разів.

У результаті дослідження властивостей запропонованої моделі виявлено наявність суттєвої похибки при моделюванні режиму пуску випрямляча (рис. 5 а).

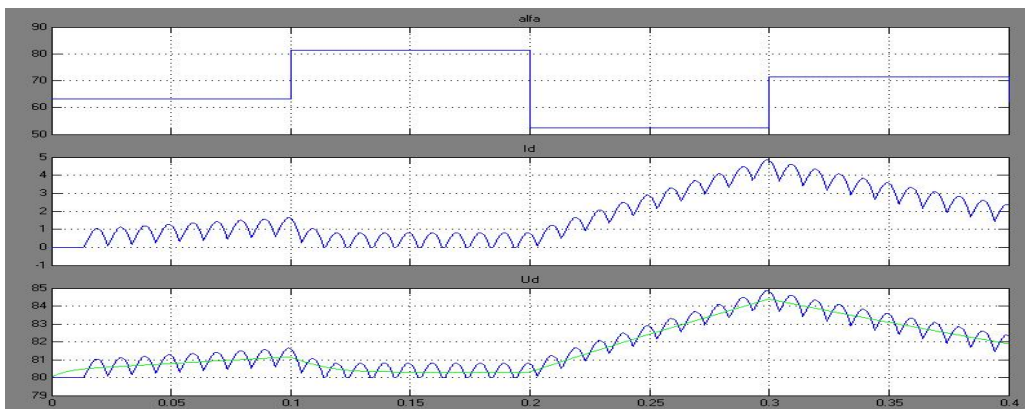
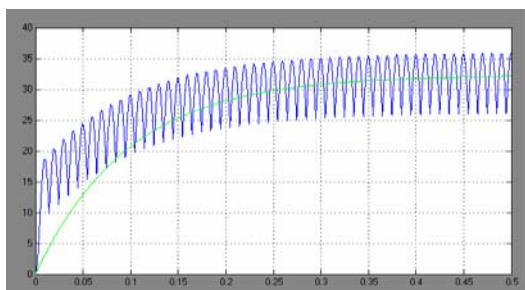
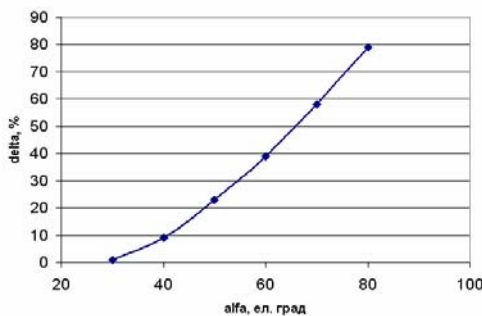


Рис. 4



а



б

Рис. 5

Наявність цієї похибки обумовлено неможливістю відтворення моделлю дискретного характеру роботи напівпровідникових ключів у реальному випрямлячі. Було виявлено, що основним фактором, який впливає на максимальне значення похибки, є кут управління тиристорів. У роботі отримано залежність максимальної похибки при пуску від кута керування. Результати дослідження цього впливу наведені на рис. 5 б.

Висновки. Запропонована візуальна модель однофазного мостового випрямляча дає змогу значно зменшити час моделювання. Вона описує роботу однофазного мостового випрямляча не тільки у режимі безперервного струму, але й у режимі переривчастого струму.

Порівняльний аналіз результатів моделювання за допомогою візуальної та схематехнічної моделей випрямляча виявив високий ступінь адекватності запропонованої візуальної моделі у обох режимах роботи однофазного мостового випрямляча.

Отримані результати дослідження впливу кута управління на максимальне значення похибки, що виникає при моделюванні пускового режиму, дають змогу враховувати виявлену властивість запропонованої моделі у разі імітаційного моделювання.

Отримана модель може бути використана як елемент бібліотеки в системі візуально-блочного моделювання електротехнічних комплексів, що запропонована у [4].

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. Санкт-Петербург: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. Санкт-Петербург: 2001. 320 с.

3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. Москва: ДМК Пресс; Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.
4. Алексеевский Д.Г. Визуальное моделирование многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Спецвипуск: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 2017. № 27(1249). С. 332–336.
5. Беркович Е.И., Ковалев В.Н., Ковалев Ф.И., Кочетков В.Д., Крылов С.С., Дурносков Б.Д., Мосткова Б.Д., Пырков В.В., Сакович А.А., Толкачев А.И. Полупроводниковые выпрямители. Под ред. Ф.И. Ковалева и Б.Д. Мостковой. Москва: Энергия, 1978. 448 с.
6. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. Москва: Высшая школа, 1974. 430 с.

УДК621.314.6

А.Г. Алексеев, канд. техн. наук, **Д.Г. Алексеевский**, канд. техн. наук, **К.О. Турышев**, **С.Л. Шмалый**, канд. техн. наук, **О.О. Панкова**

Запорожская государственная инженерная академия,
пр. Соборный, 226, Запорожье, 69006, Украина

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Рассмотрены вопросы построения и использования математической модели тиристорного однофазного мостового выпрямителя средствами визуального моделирования. В отличие от моделирования на схемотехническом уровне предложенная математическая модель обладает значительно более высоким быстродействием, что позволяет сократить время моделирования сложных электротехнических комплексов, в состав которых входит тиристорный выпрямитель. Предложенная реализация математической модели выпрямителя описывает его работу как в режиме непрерывного тока, так и в режиме прерывистого тока. Рассмотрены вопросы адекватности предложенной математической модели путем сравнения результатов моделирования, полученных с ее помощью, и результатов моделирования, полученных с помощью схемотехнической модели. Исследовано влияние угла управления на величину ошибки, которая возникает при моделировании пускового режима выпрямителя. Библи. 6, рис. 5.

Ключевые слова: математическая модель, тиристорный однофазный мостовой выпрямитель, визуальное моделирование, схемотехническая модель.

O. Alekseev, D. Alekseevskiy, K. Turyshev, S. Shmaliy, O. Pankova

Zaporizhzhia State Engineering Academy,
226, Soborny Ave., Zaporizhzhya, 69006, Ukraine

THE VISUAL MODELING OF SINGLE-PHASE BRIDGE RECTIFIER

The question of construction and using thyristor single-phase bridge rectifier mathematical modeling visual modeling resources was describes in the article. The proposed mathematical model has higher performance than the circuit simulation. This permits to reduce modeling time of complex electrical system. It includes a thyristor single-phase bridge rectifier. The proposed mathematical model implementation describes its operation in continuous current model and an intermittent current model. The question of a model adequacy the proposed mathematical model was describes by comparison of modeling results. An investigation of the control angle influence on the magnitude of the error that occurs when simulating the rectifier-starting mode. References 6, figures 5.

Key words: mathematical, thyristor single-phase bridge rectifier, visual modeling, sheet-oriented model.

1. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC. Sankt-Peterburg: KORONA-Vek, 2008. 368 p. (Rus).
2. German-Galkin S.G. Computer simulation of semiconductor systems. Sankt-Peterburg.: KORONA print, 2001 (Rus).
3. Chernyh I.V. Modeling of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink. Moskva: DМК Press; SanktPeterburg: Piter, 2008. 288 p. (Rus)
4. Alekseevskiy D.G. Visual simulation of multilink wind electric generation system. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut»*. Spetsvypusk: Problemy avtomatizirovannoho elektroprivoda. Teoriia i praktika. Kharkov: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut». Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 27(1249). P. 332–336 (Rus).
5. Berkovich E.I., Kovalev V.N., Kovalev F.I., Kochetkov V.D., Krylov S.S., Durnosov B.D., Mostkova B.D., Pyrkov V.V., Sakovich A.A., Tolkachev A.I. Semiconductor rectifiers. Moskva: Jenergiya, 1978. 448 p (Rus).
6. Chizhenko I.M., Rudenko V.S., Sen'ko V.I. Fundamentals of converter technology. Moskva: Vysshaja shkola, 1974. 430 p. (Rus).