

ВИЗУАЛЬНО-БЛОЧНАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ТИПА

Д. Г. АЛЕКСЕЕВСКИЙ, О. О. ПАНКОВА*, К. О. ТУРЫШЕВ

кафедра электронных систем, ИИ ЗНУ, г. Запорожье, Украина
*email: bloxa2007@gmail.com

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются вопросы синтеза и применения визуально-блочной математической модели импульсного преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа с использованием метода усреднения переменных состояния. Особенностью предложенной модели является учет прямых падений напряжений в силовых ключах преобразователя и потерь в индуктивности. Предложенная модель предназначена для использования в качестве компоненты визуально-блочного моделирования сложных электротехнических комплексов, в состав которых входят импульсные преобразователи постоянного напряжения. Модель описывает работу импульсного преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа как в режиме непрерывного, так и в режиме прерывистого тока. Приведен анализ адекватности предложенной визуально-блочной математической модели путем сопоставления результатов моделирования, полученных с ее помощью, и результатов моделирования, полученных с помощью схемной модели. Библ.11, рис. 9.

Ключевые слова: импульсный преобразователь постоянного напряжения; математическая модель; режим прерывистого тока; режим непрерывного тока, метод усреднения.

THE VISUAL-BLOCK MATHEMATICAL MODEL OF THE PULSE DC VOLTAGE CONVERTER INVERTER-TYPE

D. ALEKSEEVSKIY, O. PANKOVA*, K. TURYSHEV

Department of electronic system, II ZNU, Zaporizhzhya, UKRAINE

ABSTRACT. In this article be the problem of synthesis and application of the visual-block mathematical model of the pulse DC voltage converter inverter-type via use the averaging method of variables state. The specialty of propose model consists in improvement of a boost type pulse DC voltage converter simulation model, which, unlike the existing ones, takes into account direct voltage drops on semiconductor switches of devices and loss in an inductance. The proposed model intended to use as a component of the visual-block modeling of the difficult electrotechnical complex, a comprising pulse DC voltage converter. The model describes the operation of a pulse DC voltage converter inverter-type in the continuous and discontinuous current mode. The adequacy analysis of the proposed visual-block mathematical model by comparing the results of modeling obtained with its help and the results modeling of obtained using a circuit model is given. References 11, figures 9.

Keywords: pulse DC voltage converter; mathematical model; intermittent current mode; continuous current mode; averaging method

Введение

Создание моделей силовой части электротехнических комплексов является основой для процедуры синтеза системы управления, где силовое оборудование выступает в качестве компоненты объекта управления.

По мнению специалистов-практиков в области автоматизированных систем управления (АСУ) от 80 до 90 процентов трудоемкости синтеза АСУ приходится именно на этап создания математической модели объекта управления [1]. Одним из основных путей сокращения времени на синтез и отладку математической модели является использование способов построения модели с применением библиотек компонент системы.

Неотъемлемой частью библиотек компонентов для моделирования электротехнического комплекса выступают модели полупроводниковых преобразователей энергии.

Устройства преобразовательной техники, которые входят в состав комплекса, в моделях наиболее часто реализованы на схемотехническом уровне [2, 3]. Использование таких моделей сопряжено со значительными вычислительными затратами по причине того, что моделированию подвергаются процессы с существенно различной интенсивностью.

Сокращение времени моделирования для данных систем может быть достигнуто на пути применения математического описания работы полупроводниковых преобразователей в усредненных переменных.

© Д. Г. Алексеевский, О. О. Панкова, К. О. Туришев, 2019

Суть его заключается в формировании системы дифференциальных уравнений не для мгновенных значений электрических величин, а для средних значений за такт работы полупроводникового преобразователя. Данное представление значительно сокращает количество итераций, при численном решении системы дифференциальных уравнений, для процессов протекающих с различной интенсивностью.

Представленная работа посвящена синтезу и применению компонента библиотеки математических моделей для одного из устройств преобразовательной техники - импульсного преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа, реализующего метод усреднения переменных состояния.

Анализ последних достижений и литературы

Разработке усредненных математических моделей импульсных преобразователей постоянного напряжения было посвящено достаточно много работ. Исходным описанием устройства при разработке этих моделей является так называемая "импульсная модель" [4-6]. Переход от нее к "структурной модели" осуществляется путем замены ключевых элементов на пропорциональные звенья. Величина их коэффициентов пропорциональности приравняется коэффициенту заполнения ключа.

В работе [7] описывается усредненная математическая модель инвертирующего импульсного преобразователя постоянного напряжения. Автор отмечает, что большинство исследователей в области импульсных преобразователей используют схемные модели, которые обладают рядом очевидных недостатков. Приведенное математическое описание рассматривает преобразователь в частотной области и представляется достаточно сложным. Модель описывает режим прерывистого и непрерывного тока отдельно. Форма представления математической модели такова, что реализация вычислительного потока на ее основе является затруднительной.

Реализация математической модели, в которой режим непрерывного и прерывистого тока рассматриваются совместно, приведена в работах [8, 9].

В работе [10] рассмотрен метод синтеза математической модели электротехнического комплекса в форме визуально-блочной модели (ВБМ). Модель строится с использованием библиотеки компонент, сформированной на основе предложенного принципа декомпозиции объекта моделирования, основанного на его представлении в форме схемы энергетического тракта (СЭТ) [11].

Постановка проблемы

В библиотеке визуально-блочного моделирования, которое было рассмотрено в [10, 11], отсутствует элемент, описывающий работу

импульсного преобразователя инвертирующего типа. Данная модель должна быть реализована в усредненных переменных состоянии, и должна описывать работу преобразователя в режиме непрерывного тока, с возможностью перехода в режим прерывистого тока и обратно.

Важным аспектом применения данной модели является ее адекватность, с точки зрения точности воспроизведения свойств реального устройства.

Цель статьи. Таким образом, целью данной работы является определение факторов, влияющих на точность усредненной визуально-блочной модели импульсного преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа, а также характера и степени этого влияния.

Методы исследования. Цель работы достигалась путем сопоставления результатов моделирования, полученного с помощью ВБМ и, взятой в качестве эталонной, схемной модели.

Материалы и результаты исследования

Электрическая схема импульсного преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа приведена на рисунке 1.

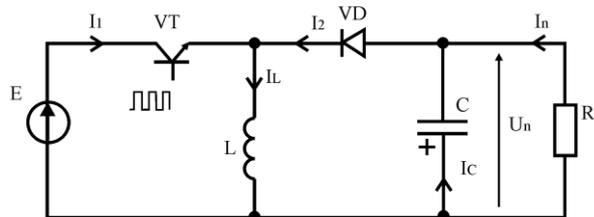


Рис. 1 - Электрическая схема импульсного преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа

Особенностью ИППН инвертирующего типа, по сравнению с ИППН понижающего (рис. 2) и повышающего (рис. 3) типа, с точки зрения структуры энергетического тракта, является то, что ключевые элементы структурно разделены индуктивным накопителем энергии (рис. 4), а не сосредоточены в одном элементе.



Рис. 2 - СЭТ ИППН понижающего типа

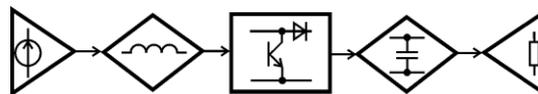


Рис. 3 - СЭТ ИППН повышающего типа

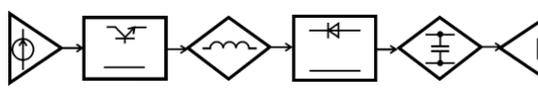


Рис. 4 - СЭТ ИППН инвертирующего типа

В связи с этим, для включения ИППН инвертирующего типа в общую модель, требуется введение описания двух блоков: блока транзисторного ключевого элемента и блока диодного ключевого элемента.

Транзисторный ключевой элемент осуществляет преобразование входного напряжения ИППН E (для данного блока - " U_+ ") в напряжение, прикладываемое к индуктивному накопителю со стороны входного источника энергии (для данного блока - " U_- "), в соответствии с коэффициентом заполнения открытого состояния транзистора γ_{VT} . Данное преобразование осуществляется в направлении "прямой" причинно-следственной связи.

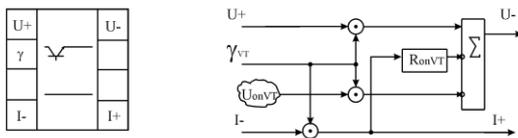


Рис. 5 -. Визуальная модель и обозначение транзисторного ключевого элемента ВБМ

Для обратной причинно-следственной связи данный блок преобразует ток индуктивного накопителя I_L (для данного блока - " I_- ") во входной ток преобразователя (для данного блока - " I_+ ").

Выходное напряжение определяется с учетом прямого падения напряжения на транзисторе:

$$U_- = U_+ \cdot \gamma_{VT} - U_{on_VT} \cdot \gamma_{VT} - R_{on_VT} \cdot I_+, \quad (1)$$

где U_{on_VT} - прямое пороговое падение напряжения на транзисторе,

R_{on_VT} - прямое дифференциальное сопротивление транзистора.

Входной ток блока определяется из выражения:

$$I_+ = I_- \cdot \gamma_{VT}. \quad (2)$$

Визуальная модель и обозначение транзисторного ключевого блока приведена на рисунке 5.

Диодный ключевой элемент осуществляет преобразование тока индуктивного накопителя I_L (для данного блока - " I_+ ") в выходной ток ИППН (для данного блока - " I_- "), в соответствии с коэффициентом заполнения открытого состояния диода γ_{VD} . Данное преобразование осуществляется в направлении "прямой" причинно-следственной связи.

Для "обратной" причинно-следственной связи данный блок преобразует напряжение на выходе ИППН U_n (для данного блока - " U_- ") в напряжение, прикладываемое к индуктивному накопителю со стороны выхода ИППН (для данного блока - " U_+ ").

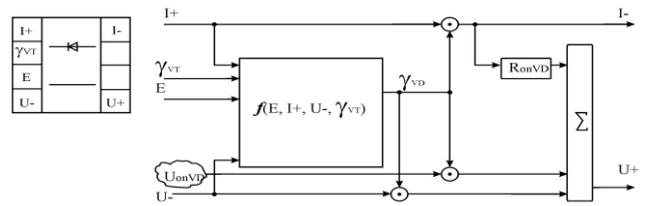


Рис. 6 -. Визуальная модель и обозначение диодного ключевого элемента ВБМ

Выходной ток блока определяется из выражения (3):

$$I_- = I_+ \cdot \gamma_{VD}. \quad (3)$$

Входное напряжение определяется с учетом прямого падения напряжения на диоде:

$$U_+ = U_- \cdot \gamma_{VD} + U_{on_VD} \cdot \gamma_{VD} + R_{on_VD} \cdot I_-, \quad (4)$$

где U_{on_VD} - прямое пороговое падение напряжения на диоде,

R_{on_VD} - прямое дифференциальное сопротивление диода.

Коэффициент заполнения открытого состояния диода определяется для режима непрерывного и прерывистого тока с помощью выражений (5) и (6).

$$\gamma_{VD} = \begin{cases} \frac{-\tau_2 \ln \left[1 - \frac{(E - U_{on_VD}) R_2}{(U_- + U_{on_VD}) R_1} \left(1 - e^{-\frac{T \gamma_{VT}}{\tau_1}} \right) \right]}{T} & \text{при } I_+ < \frac{E \cdot \gamma_{VT} \cdot T}{2 \cdot L} \\ 1 - \gamma_{VT} & \text{при } \frac{E \cdot \gamma_{VT} \cdot T}{2 \cdot L} \leq I_+ \end{cases} \quad (5)$$

где L - индуктивность накопителя,
 E - напряжение источника питания,
 T - длительность такта работы ИППН.

$$\tau_1 = L / R_1, \quad R_1 = R_L + R_{on_VT},$$

$$\tau_2 = L / R_2, \quad R_2 = R_L + R_{on_VD}, \quad (6)$$

где R_L - активное сопротивление индуктивного накопителя.

Визуальная модель и обозначение диодного ключевого блока приведена на рисунке 6.

Визуально-блочная модель преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа, соответствующая структуре энергетического тракта, приведена на рисунке 7.

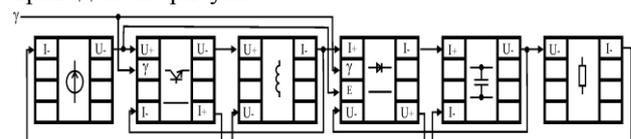


Рис. 7 -. Визуально-блочная модель преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа

Временные диаграммы тока через индуктивность, полученные с помощью ВБМ, приведены на рисунке 8.

На диаграмме пилообразной кривой соответствует результат, полученный с помощью схемной модели, гладкая линия соответствует ВБМ.

На начальном этапе переходного процесса наблюдается режим непрерывного тока. Далее, по достижении усредненного тока критического значения, преобразователь переходит в режим прерывистого тока.

Полученные диаграммы показывают приемлемую, с точки зрения использования на практике, точность ВБМ.

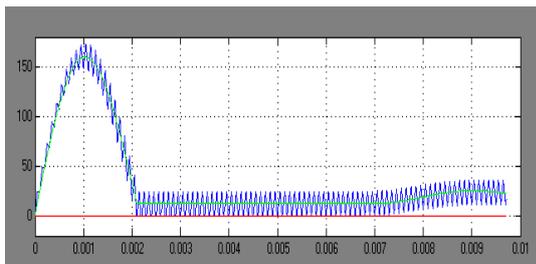


Рис. 8 -. Результаты моделирования тока индуктивности, полученные для ВБМ и схемной модели

Следует заметить, что описанная выше модель была построена при допущении о постоянстве выходного напряжения в течение рабочего такта.

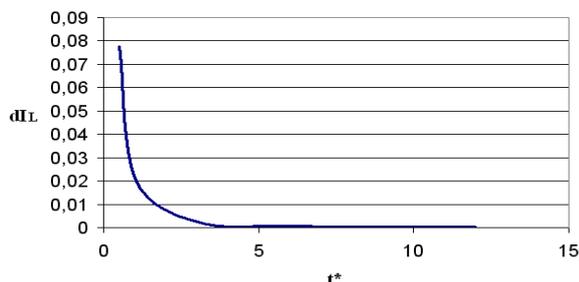


Рис. 9 -. Зависимость величины относительной ошибки моделирования от относительной постоянной времени выходной цепи

Однако при уменьшении постоянной времени выходной цепи относительно длительности такта работы преобразователя наблюдается рост ошибки моделирования, вследствие непостоянства напряжения на выходном конденсаторе в течение такта работы ИППН.

В данной работе было проведено исследование влияния относительной постоянной времени выходной цепи $t^* = R_n C / T$ на величину относительной ошибки моделирования в установившемся режиме непрерывного тока. Полученные результаты показаны на рис. 9.

Выводы

Результаты моделирования, полученные с помощью предложенной визуально-блочной модели,

свидетельствуют об ее адекватности. Однако при ее применении следует учитывать появление ошибки в режимах работы преобразователя, при которых наблюдается существенное изменение напряжения на выходном конденсаторе в течение рабочего такта.

Список литературы

1. **Phillips C. L.** Feedback Control Systems / C. L. Phillips, R. D. Harbor. – N.J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2000. – 616 p.
2. **Герман-Галкин С. Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем / С. Г. Герман-Галкин. – СПб: КОРОНА Принт, 2001. – 320 с.
3. **Черных И. В.** SIMULINK: среда создания инженерных приложений [Текст] / И. В. Черных. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. – 274 с.
4. **Четти П.** Проектирование ключевых источников электропитания / П.Четти. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
5. **Белов Г.А.** Динамика импульсных преобразователей / А.Г. Белов. – Чебоксары: Издательство Чувашского университета, 2001. – 528 с.
6. **Белов Г.А.** Структурные динамические модели и частотный метод синтеза двухконтурных систем управления импульсными преобразователями / А.Г. Белов, А.В. Серебрянников, А. А. Павлова // Силовая электроника. – 2008. – №3. – С. 98-106.
7. **Белов Г.А.** Усредненные структурные динамические модели инвертирующего импульсного преобразователя / Г. А. Белов, Г. В. Малинин, Ю. М. Семенов // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 4.(52) – С. 28-35.
8. **Капустин И.В.** Обобщенная непрерывная модель импульсного понижающего преобразователя как объекта управления / И.В. Капустин, А.В. Лукашенко // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. № 2. – С. 136–145.
9. **Капустин И.В.** Математическое моделирование и анализ импульсного повышающего преобразователя напряжения / И.В. Капустин, А.В. Лукашенко // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. № 2. – С. 126–135.
10. **Alekseevskiy D.** "Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes" / D. Alekseevskiy, O.Pankova, R. Khrestin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2018. – № 6/9(96). – С. 48-54.
11. **Алексеевский Д.Г.** Визуальное моделирование многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем / Д.Г. Алексеевский, // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2017. – № 27(1249). – С. 332-336.

References (transliterated)

1. **Phillips C. L.** Feedback Control Systems / C. L. Phillips, R. D. Harbor. – N.J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2000. – 616 p.
2. **German-Galkin S.G.** Kompyuternoye modelirovaniye poluprovodnikovyykh sistem [Computer simulation of semiconductor systems]. St. Petersburg, 2001, 320 p.
3. **Chernykh I.V.** SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy [SIMULINK: engineering application creation environment]. S. G. German-Galkin. – SPb: KORONA Print, 2001. – 320 s.

4. **Chetti P.** Proyektirovaniye klyuchevykh istochnikov elektropitaniya [Designing key power supplies]. *P.Chetti. – M.: Energoatomizdat, 1990. – 240 s.*
5. **Belov G.A.** Dinamika impulsnykh preobrazovateley. [Dynamics of pulse converters]. *A.G. Belov. – Cheboksary: Izdatelstvo Chuvashskogo universiteta, 2001. – 528 s.*
6. **Belov G.A., Malinin A.V., Pavlova A.A.** Strukturnye dinamicheskiye modeli i chastotny metod sinteza dvukhkonturnykh sistem upravleniya impulsnyimi preobrazovatelyami. [Structural dynamic models and frequency method for the synthesis of dual-circuit control systems of pulse converters]. *Silovaya elektronika. [Applied electronics]. – 2008, (№3.) – S. 98-106.*
7. **Belov G.A., Serebryannikov G.V., Semenov YU.M.** Usrednennyye strukturnyye dinamicheskiye modeli invertiruyushchego impulsnogo preobrazovatelya [Averaged structural dynamic models of an inverting pulse converter]. *Prakticheskaya silovaya elektronika. – 2013. – № 4.(52) – S. 28-35.*
8. **Kapustin I.V.** Obobshchennaya nepreryvnaya model impulsnogo ponizhayushchego preobrazovatelya kak obyekta upravleniya [Generalized continuous model of a pulse down converter as a control object]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2013. – Vyp. № 2. – S. 136–145.*
9. **Kapustin I.V., Lukashenkov A.V.** Matematicheskoye modelirovaniye i analiz impulsnogo povyshayushchego preobrazovatelya napryazheniya [Structural dynamic models and frequency method for the synthesis of dual-circuit control systems of pulse converters]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2013. – Vyp. № 2. – S. 126–135.*
10. **Alekseevskiy D.** Poryadok sinteza modeley elektrotekhnicheskikh kompleksov [Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – 2018. – № 6/9(96). – C. 48-54.*
11. **Alekseyevsky D.G.** Vizualnoye modelirovaniye mnogokanalnykh vetroelektrogeneriruyushchikh sistem [Visual modeling of multichannel wind power generating systems]. *Visnik natsionalnogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivsky politekhnichny institut". – 2017. – № 27(1249). – S. 332-336.*

Сведения об авторах (About authors)

Алексеєвський Дмитрій Геннадієвич - кандидат технічних наук, доцент, Інженерний інститут Запорізького національного університету, доцент кафедри електронних систем, г. Запоріжжя, Україна; e-mail: lasian2017@ukr.net.

Dmitriy Alekseevskiy - Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, [Engineering Institute of Zaporizhzhia National University](#), Docent of Department of Electronic system, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: lasian2017@ukr.net.

Панкова Ольга Олеговна - аспірант, Інженерний інститут Запорізького національного університету, аспірант кафедри електронних систем, г. Запоріжжя, Україна; e-mail: bloxa2007@gmail.com.

Olga Pankova - postgraduate student, [Engineering Institute of Zaporizhzhia National University](#), postgraduate student of Department of Electronic system, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail bloxa2007@gmail.com.

Турьшев Константин Олегович - ассистент, Інженерний інститут Запорізького національного університету, ассистент кафедри електронних систем, г. Запоріжжя, Україна; e-mail: k_turyshev@ukr.net.

Konstantin Turyshev - assistant, [Engineering Institute of Zaporizhzhia National University](#), assistant of Department of Electronic system, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: k_turyshev@ukr.net.

Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Алексеєвський, Д. Г. Візуально-блокова модель імпульсного преобразователя постійного напруги інвертуючого типу / **Д. Г. Алексеєвський, О. О. Панкова, К. О. Турьшев** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 53-57. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.07.

Please cite this article as:

Alekseevskiy, D., Pankova, O., Turyshev, K. Visual-block model pulse converter DC voltage inverting type. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 20 (1345), 53-57, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.07.

Будь ласка, посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Алексієвський, Д. Г. Візуально-блокова модель імпульсного перетворювача постійної напруги інвертуючого типу / **Д. Г. Алексеєвський, О. О. Панкова, К. О. Турьшев,** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019 – № 20 (1345). – С. 53-57. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.07.

АНОТАЦІЯ. У статті розглядаються питання синтезу та застосування візуально-блокової математичної моделі імпульсного перетворювача постійної напруги інвертуючого типу з використанням методу усереднення змінних стану. Особливістю запропонованої моделі є врахування прямих падінь напруг в силових ключах перетворювача та втрат в індуктивності. Запропонована модель призначена для використання в якості компоненти візуально-блокового моделювання складних електротехнічних комплексів, до складу яких входять імпульсні перетворювачі постійної напруги. Модель описує роботу імпульсного перетворювача постійної напруги інвертуючого типу як в режимі безперервного, так і в режимі переривчастого струму. Наведено аналіз адекватності запропонованої візуально-блокової математичної моделі шляхом зіставлення результатів моделювання, що були отримані з її допомогою та результатів моделювання отриманих за допомогою схемної моделі.

Ключові слова: імпульсний перетворювач постійної напруги; математична модель; режим переривчастого струму; режим безперервного струму; метод усереднення

Надійшла (received) 25.06.2019