

DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-150-165

УДК 621.314.6

ББК 31.291-04

А.П. ЧЕРВОНЕНКО, Д.А. КОТИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СРЕДЕ МАТЛАБ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Ключевые слова: электропривод, моделирование полупроводниковых выпрямителей, тиристорный преобразователь.

Предлагается исследование методов синтеза имитационных моделей полупроводниковых выпрямителей. Моделирование полупроводниковых выпрямителей на сегодняшний день достаточно изучено, однако многие авторы проводят синтез по своему уникально. Необходимость применения высоких технологий в регулируемых электроприводах с развитием механизмов и рабочих машин растет, автоматизированный регулируемый электропривод внедряется все активнее, составляя энергетическую основу агрегатов и рабочих машин. Актуальность данной работы объясняется тем, что в настоящее время развивающиеся технологии позволяют изготавливать более совершенные полупроводниковые элементы. Тем актуальнее и значимее исследование уточненных цифровых моделей электроприводов, содержащих полупроводниковые преобразователи. В данной работе будут обобщены известные подходы к разработке цифровых моделей выпрямителей, а также предложено свое видение данного вопроса – учет как можно большего количества индивидуальных особенностей полупроводниковых элементов и всей системы электропривода в целом. Предложенный к рассмотрению вариант отличается тем, что при разработке в среде Matlab согласуются параметры реально существующих силовых элементов и их цифровых аналогов. Также в статье рассмотрен вопрос создания цифровой модели реверсивной системы электропривода тиристорный преобразователь – двигатель, проиллюстрированы переходные характеристики уточненной модели. Результатом данного исследования является анализ различных подходов к моделированию полупроводниковых преобразователей в системах электропривода. В связи с этим был рассмотрен уточненный подход к моделированию полупроводниковых выпрямителей, заключающийся в максимальном приближении структуры схемы модели к реальной реализации, учете всех элементов, входящих в структуру вентильного электропривода. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что разработанные имитационные модели могут быть использованы для проектирования реального силового преобразователя в условиях производственного предприятия.

Анализ существующих имитационных моделей полупроводниковых выпрямителей в широкодоступной литературе показывает, что большинство разработчиков склоняется к выбору релейных элементов и различного рода ключей для их моделирования. Многие известные модели не учитывают нелинейность самого полупроводникового элемента (о нелинейности тиристорных написано большое количество научных статей и учебных пособий). Поэтому возникает необходимость в создании таких цифровых моделей, которые бы максимально учли все несовершенство и неидеальности силовых элементов.

Получение подобных имитационных моделей – достаточно трудоемкий процесс, но, только выполнив его, можно получить наглядное представление о том, как будет работать реальная система электропривода. Уже на начальном этапе проектирования системы электропривода появляется возможность с по-

мощью предлагаемой методики составления уточненных цифровых моделей понять, в правильном ли направлении осуществляется работа, имеется ли целесообразность в создании макетного (опытного) образца ЭП. Другими словами, стоит ли тратить время, средства, усилия на дальнейшую разработку.

Безусловно, выбранная концепция научного исследования больше подходит непосредственно для инженерного проектирования, тогда как замена полупроводников релейными элементами и различного рода ключами несколько не вредит обычному исследованию работы полупроводниковых выпрямителей, пониманию общей картины и, следовательно, имеет место быть.

Выполним более подробный анализ существующих подходов к созданию цифровых моделей полупроводниковых преобразователей.

Очень глубоко и подробно синтез полупроводниковых выпрямителей рассмотрен в работах С.Г. Германа-Галкина [5–10]. Начиная с простейших имитационных структур, содержащих полупроводниковые приборы, и заканчивая современными синхронными ЭП, автор предлагает единую концепцию построения цифровых моделей привода. При построении имитационных моделей выпрямителей в программном пакете Matlab-Simulink используются как виртуальные, так и функциональные модели (в частности, используются блоки Subblocks, а именно ControlSystem – система управления выпрямителем и блок Rectifier, который выполняет функцию силового тиристорного моста). Нужно отметить, что помимо тиристорного ЭП автор рассматривает и схемные реализации силовых транзисторных ключей.

Другие не менее известные авторы П.А. Борисов, В.С. Томасов в своих работах [1–4, 16–18] также достаточно подробно исследуют вопрос синтеза имитационных моделей управляемых выпрямителей. Несмотря на то, что авторы часто используют готовые блоки мостов (такие, как Universal Bridge), схемы насыщены различного рода фильтрами, измерительными блоками, индикаторами. Примечательно и то, что в этих примерах применяется программирование, в созданный m-файл заносят готовые формулы, автоматизируя тем самым процесс расчета при переборе значений параметров функциональных блоков. Нужно отметить, что в данном пособии помимо структурных схем приводится подробный расчет параметров системы преобразователя (силового источника питания, трансформатора, дросселя и др.).

В качестве источника по использованию программы Matlab можно привести работы М.С. Лурье, О.М. Лурье и А.А. Суптеля [11–13, 15]. В работах подробно приведены основные сведения о системе Matlab, достаточно профессионально разобраны методы расчета для различных имитационных режимов, вопросы программирования, построения графиков и функций. Нужно отметить, что в пособиях дается полное пояснение достаточно большого количества блоков и библиотек, так или иначе связанных с электротехнической отраслью. Нужно отметить, что отдельно приводятся наглядные переходные процессы (для угловой скорости, момента, тока якоря), полученные в результате моделирования электрических машин. Ну и, конечно же, приведен синтез схем преобразовательной техники: трехфазного однополупериодного выпрямителя, модели ШИМ преобразователя напряжения и др. Последовательное изучение дан-

ного литературного источника с самых азов до сложного синтеза систем ЭП благотворно влияет на уровень ознакомления с программой Matlab, повышает компетенцию исследователя, специалиста-проектировщика.

В рассмотренных выше литературных источниках по-своему уникально осуществлен подход к исследованию полупроводниковых выпрямителей в среде Matlab. В приведенных моделях часто акцентируется внимание на различного рода измерительном оборудовании, индикаторах, особенно на релейных элементах и ключах. При синтезе более сложных систем ЭП это изобилие может сыграть и отрицательную роль – потребуются значительные аппаратные средства для выполнения расчетов. Однако разработчику всегда хочется иметь возможность максимально использовать в цифровой модели значимые паспортные данные тиристоров, двигателя, трансформатора, питающей сети.

Далее будет предложена уточненная имитационная модель системы ЭП по схеме «Тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д) способная, на взгляд авторов, решить описанные выше проблемы.

Уточнение данного способа моделирования сводится к тому, что за основу берется реально существующая система электропривода. Далее реальным элементам данной системы определяются виртуальные аналоги в среде Matlab (полупроводниковые элементы, электродвигатели, системы импульсно-фазового управления и др.). Общий смысл сводится к тому, чтобы создать максимально «реальные» условия моделирования. В данной работе авторы старались максимально точно учесть практические особенности при реализации системы управления тиристорными преобразователями.

При разработке цифровой модели за основу была взята общая электрическая схема электропривода с полупроводниковым преобразователем, включающая в себя трехфазный источник переменного напряжения, силовое согласующее устройство, выпрямительный агрегат. В качестве нагрузки используется обмотка якоря двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ).

Итоговая цифровая модель по своей структуре во многом повторяет вышеописанную общую схему (рис. 1).

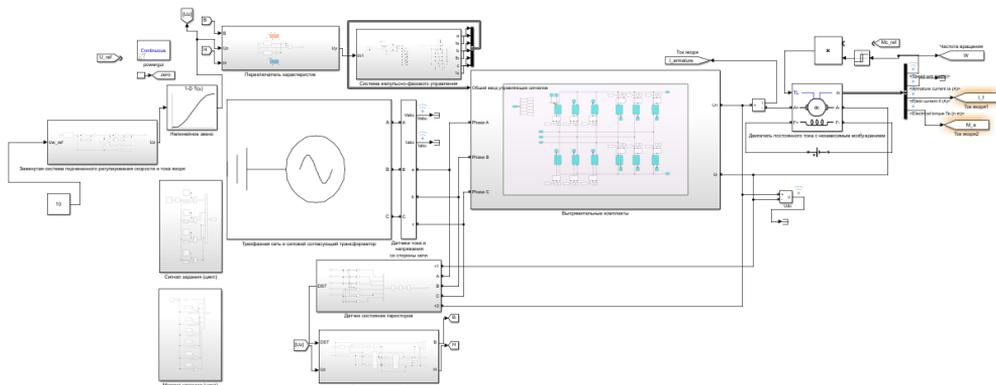


Рис. 1. Модель системы электропривода ТП-Д

Обратные связи (по току якоря и скорости) заведены с соответствующих координат электродвигателя.

К трехфазному источнику переменного напряжения подключается трансформаторное силовое согласующее устройство (рис. 2).

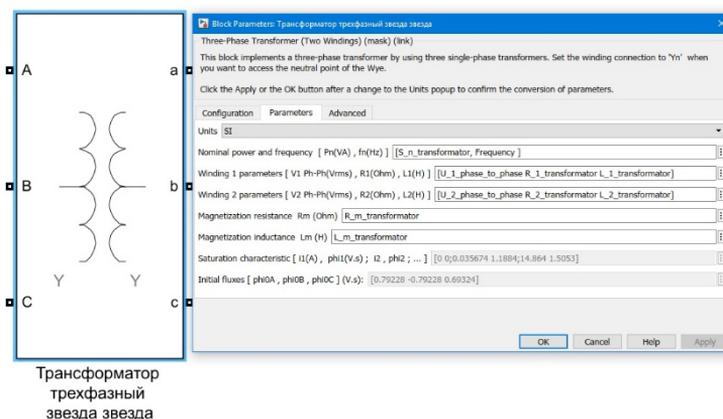


Рис. 2. Трансформаторное силовое согласующее устройство

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения реализован в блоке, приведенном рис. 3. В данной работе будут использоваться параметры двигателя постоянного тока независимого возбуждения 2ПН160ЛУХЛ4.

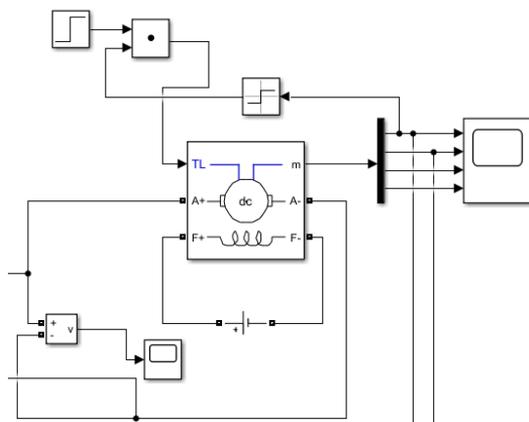


Рис. 3. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

Выпрямительные комплекты с датчиком состояния тиристоров (рис. 4) и система подчиненного регулирования СПР, система импульсно-фазового управления (СИФУ), на вход которой приходит сигнал с переключателя характеристик (ПХ), приведены на рис. 5.

При построении СИФУ использовалась идеализированная регулировочная характеристика (рис. 6).

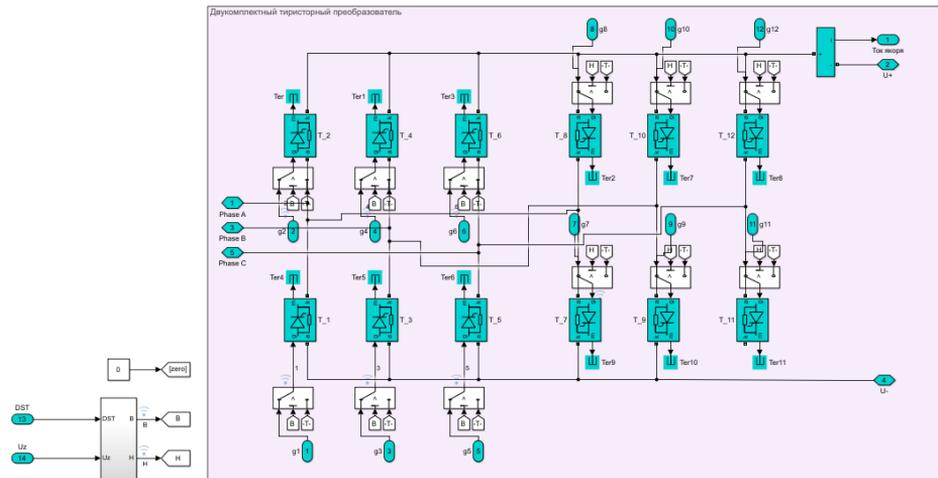


Рис. 4. Выпрямительные комплекты и датчик состояния тиристоров

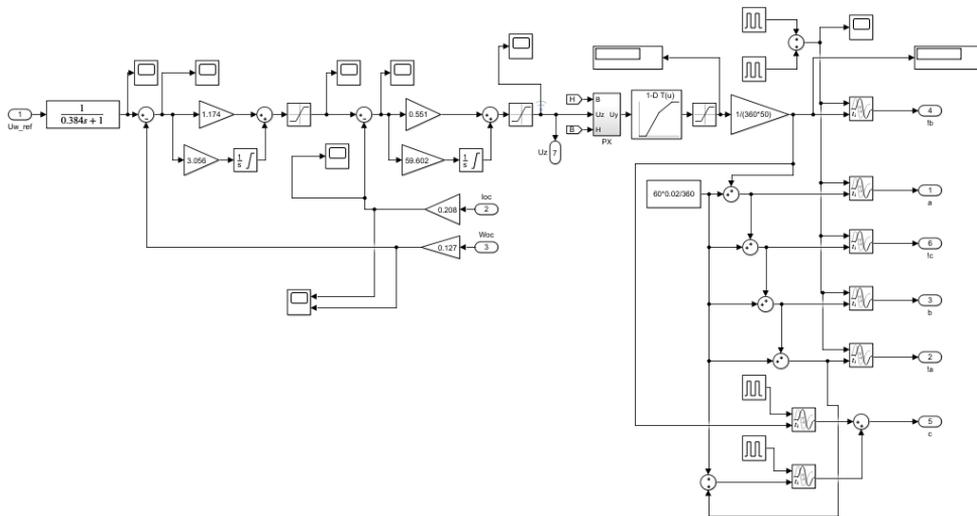


Рис. 5. СПР, СИФУ и ПХ

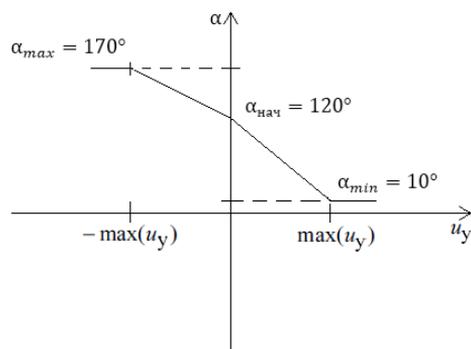


Рис. 6. Регулировочная характеристика СИФУ

Рассмотрим отдельно устройство и работу системы импульсно-фазового управления. Перед блоком с регулировочной характеристикой СИФУ установлен релейный элемент Saturation (см. рис. 7), ограничивающий максимальное и минимальное значения сигнала управления ($-10; 10$). С помощью Gain1 осуществляется перевод значения угла регулирования, выраженного в градусах, в соответствующую ему временную задержку. На Display отражены значения угла регулирования в градусах и временная задержка в секундах, соответственно. Формирование сдвоенных управляющих импульсов осуществляется с помощью блоков Pulse Generator (PG), которые далее еще сдвигаются на 60 градусов с помощью блока Constant для формирования импульсов на соответствующие тиристоры. Блок Variable Transport Delay имеет два входа: на первый подается последовательность сдвоенных импульсов, на второй – временная задержка, на которую эти импульсы должны быть сдвинуты. Для шестого тиристора схемы подача импульсов реализована отдельными блоками Pulse Generator, так как данный тиристор находится в работе в паре с первым (заканчивает работу) и в паре с пятым тиристором (начинает работу).

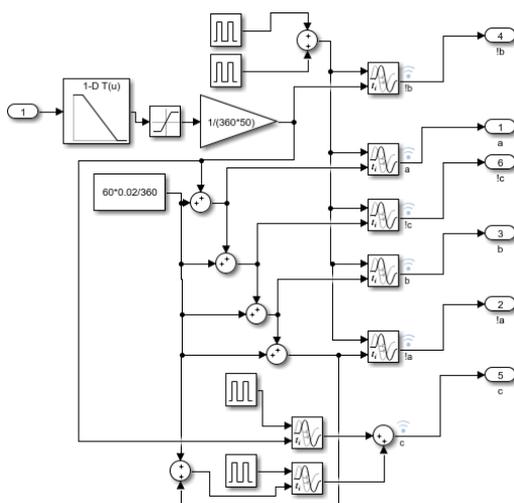


Рис. 7. Структурная схема СИФУ в среде Matlab

Рассмотрим результат формирования импульсов (рис. 8), соответствующие эпюры приведены ниже для угла регулирования, равного 21 градусу.

Данная система построена исходя из понимания, какой результат необходимо получить в итоге. Ее удобно использовать при исследовании, но при необходимости технической реализации имеют место существенные недостатки, связанные с отсутствием в среде разработки цифровых систем управления реальными ЭП функциональных блоков, аналогичных тем, что используются в Matlab.

Поэтому в дальнейших исследованиях в области данной тематики планируется создание линейной СИФУ, построенной по принципу вертикального управления, по которому строится большинство современных СИФУ.

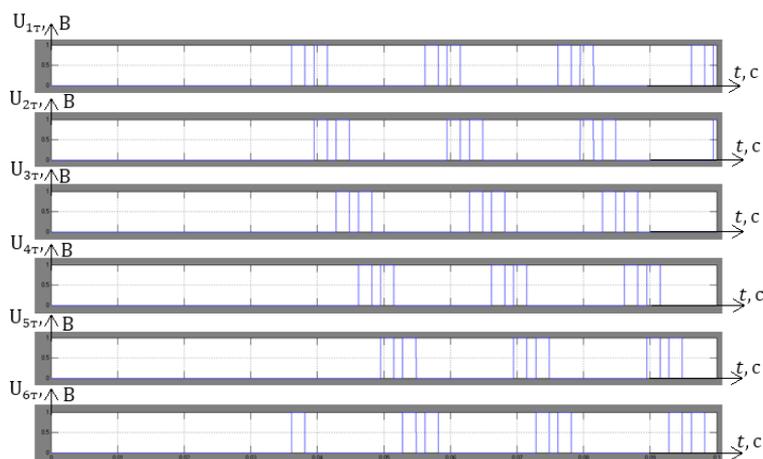


Рис. 8. Процесс формирования управляющих импульсов на тиристоры преобразователя

На рис. 9 приведена схема трехканальной СИФУ[4], на которой используются следующие обозначения: К – компаратор (выделяет момент прохождения суммы сигналов управления и опорного через ноль); ФДИ – формирователь длительности импульсов; ГОС – генератор опорного сигнала; ЛБ – логический блок, который распределяет управляющие и формирует двойные импульсы; УМ – усилитель мощности; ИТ – импульсный трансформатор.

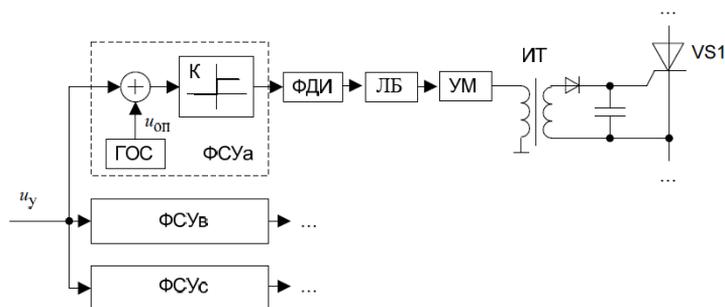


Рис. 9. Функциональная схема СИФУ

Реализация подобной схемы в среде Matlab – сложная задача, имеющая свои достоинства (детализированное понимание работы ЭП) и недостатки (сильное усложнение конечной схемы, увеличение времени расчетов). В целях нахождения компромисса между подробностью схемы и аппаратными возможностями персонального компьютера следует несколько видоизменить структуру СИФУ.

Ниже приведена структурная схема СИФУ (рис. 10), составленная в среде Matlab.

С помощью блоков технической реализации (Repeating Sequence, Transport Delay, Switch) достигаются следующие операции: генерируется опорный сигнал, выделяются моменты прохождения суммы сигналов через ноль, формируется длительность импульсов; осуществляется формирование

сдвоенных импульсов с последующим распределением на соответствующие тиристоры. Стоит отметить, что функциональный блок Pulse Generator здесь уже отсутствует.

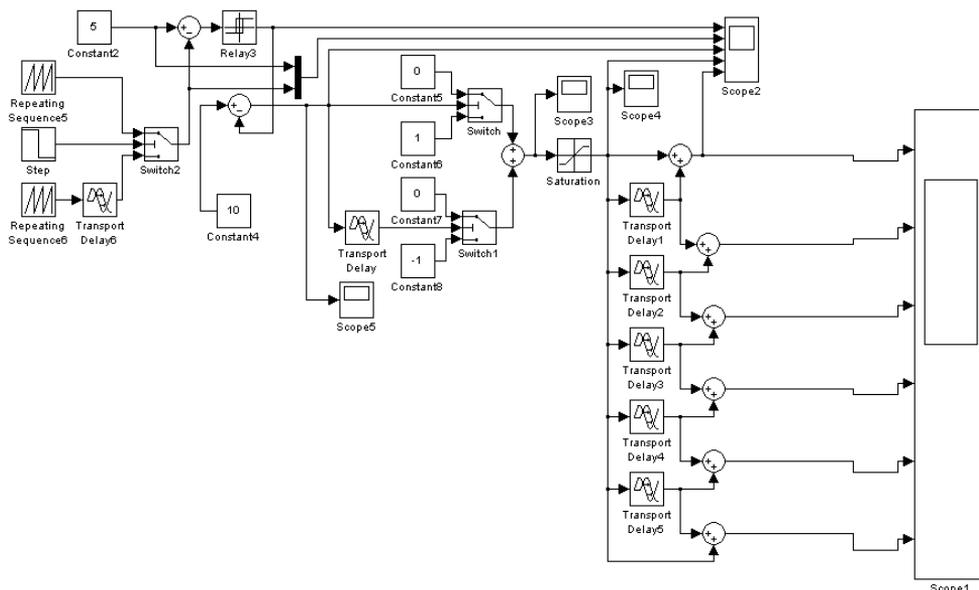


Рис. 10. Структурная схема СИФУ среде Matlab, построенная по принципу вертикального управления

На рис. 11 приведен процесс формирования импульсов управления средствами разработанной СИФУ, наглядно демонстрирующий принцип ее работы.

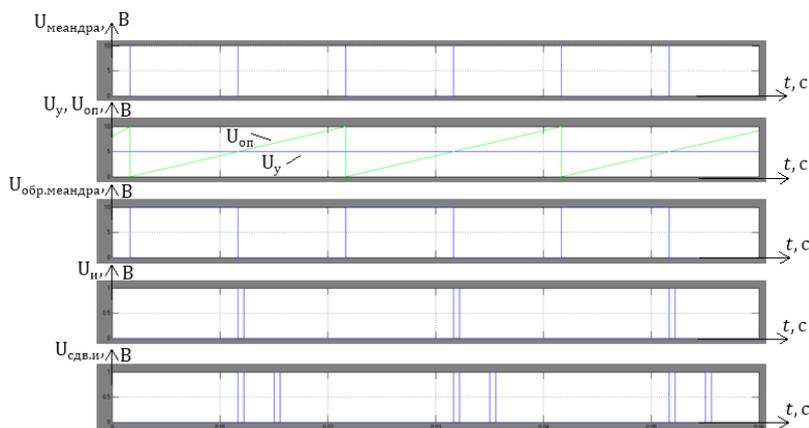


Рис. 11. Процесс формирования импульсов

Полученная последовательность управляющих импульсов приведена на рис. 12.

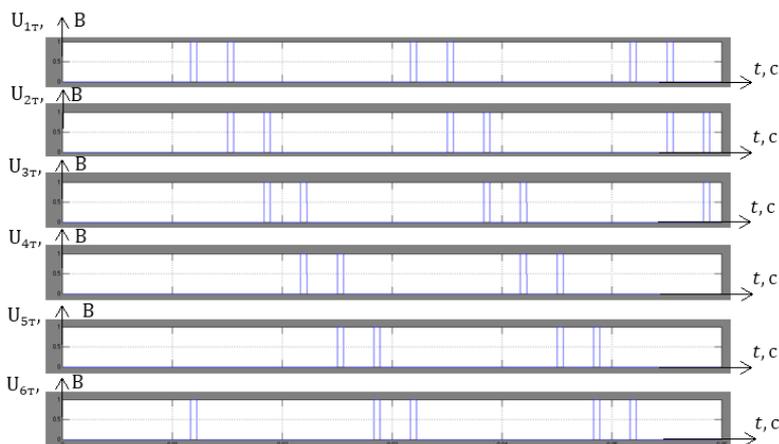


Рис. 12. Последовательность управляющих импульсов

Для достижения желаемых показателей качества электропривода по схеме ТП-Д синтезирована система подчиненного регулирования (СПР) частоты вращения двигателя. Совместная цифровая модель СПР частоты вращения двигателя и СИФУ представлена на рис. 13.

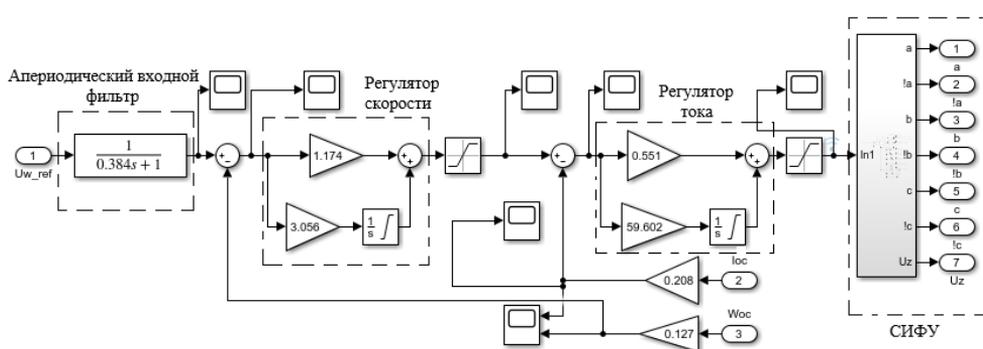


Рис. 13. Полная цифровая модель системы управления ЭП с полупроводниковым преобразователем

Синтез контуров регулирования представленной СПР осуществляется на основе стандартных настроек и подробно описан, например, в работе [14].

Продemonстрируем работу выпрямительного комплекта «Вперёд» для различных величин сигнала задания.

Доказательством корректной работы спроектированной системы электропривода являются приведенные выше переходные процессы для сигнала управления 1 В (рис. 14).

Продemonстрируем те же координаты для сигнала управления 6 В с набросом номинальной нагрузки в момент времени $t = 1,7$ с (рис. 15).

На рис. 16 приводятся аналогичные переходные процессы для сигнала управления 10 В. Двигатель развивает свою номинальную скорость 78,54 1/с, стабилизация скорости выполняется, ток якоря (24 А) и момент (57,858 Н·м) имеют свои номинальные значения.

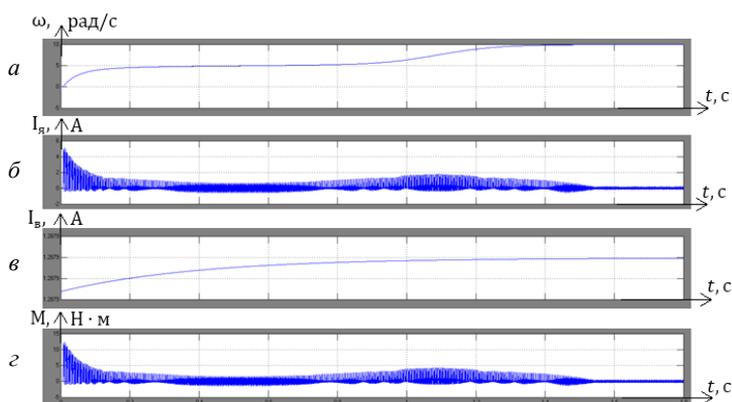


Рис. 14. Разгон ДПТ НВ для сигнала управления 1 В:
a – скорость двигателя; *б* – ток якоря;
в – ток возбуждения; *г* – электромагнитный момент

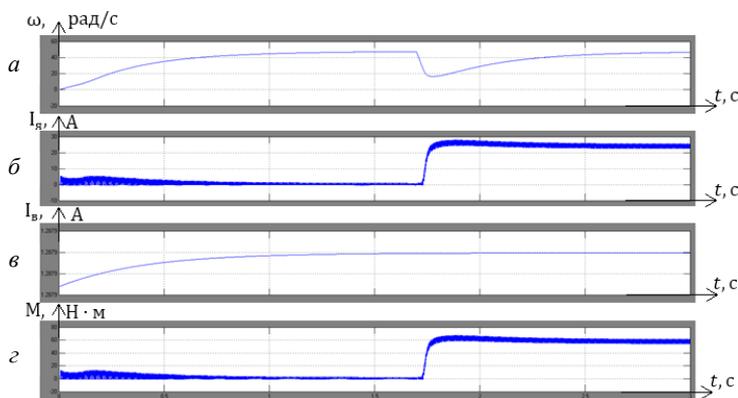


Рис. 15. Разгон ДПТ НВ и наброс номинальной нагрузки для сигнала управления 6 В:
a – скорость двигателя; *б* – ток якоря; *в* – ток возбуждения; *г* – электромагнитный момент

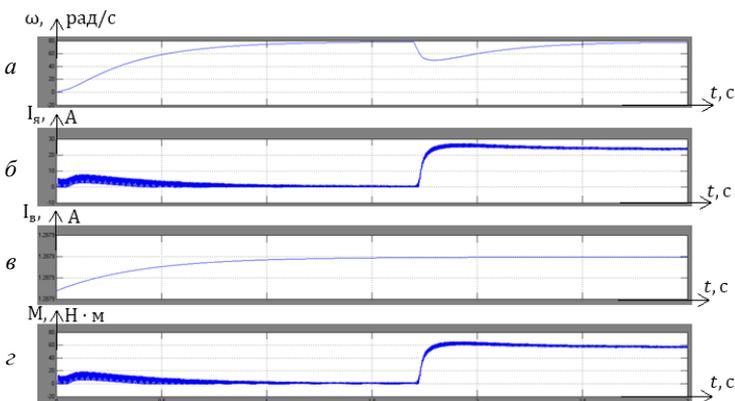


Рис. 16. Разгон ДПТ НВ и наброс номинальной нагрузки для максимального сигнала управления 10 В:
a – скорость двигателя; *б* – ток якоря; *в* – ток возбуждения;
г – электромагнитный момент

На рис. 17 демонстрируется, как изменяется угол регулирования во время работы электропривода. Из данного рисунка можно увидеть, что угол регулирования находится в допустимых пределах (не выходит за границу заданных безопасных углов регулирования – 10 и 170 градусов).

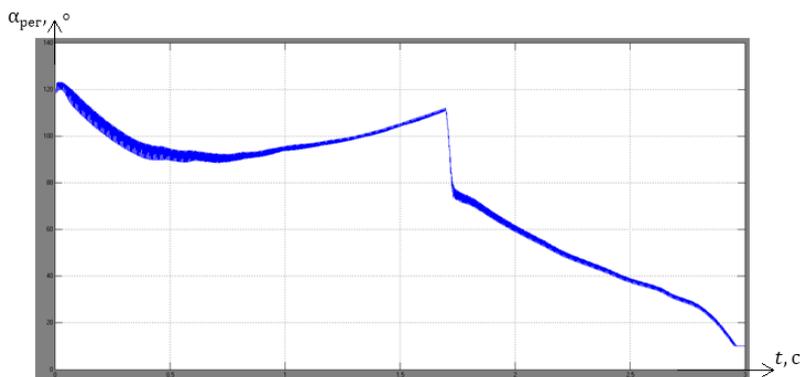


Рис. 17. Эпюры угла регулирования α при сигнале управления 10 В

Покажем работу электропривода для определенного режима работы, когда будут задействованы оба выпрямительных комплекта, а логика раздельного управления позволит корректно осуществить переключение с одного выпрямительного комплекта на другой. Подсистемы, реализующие режим работы ЭП, приведены на рис. 18, а их содержание раскрывается на рис. 19. Полученные переходные процессы режима работы системы электропривода приведены на рис. 20.

Сравним переходные процессы по скорости и току якоря без функционального преобразователя ЭДС и нелинейного звена и с их включением (рис. 21).

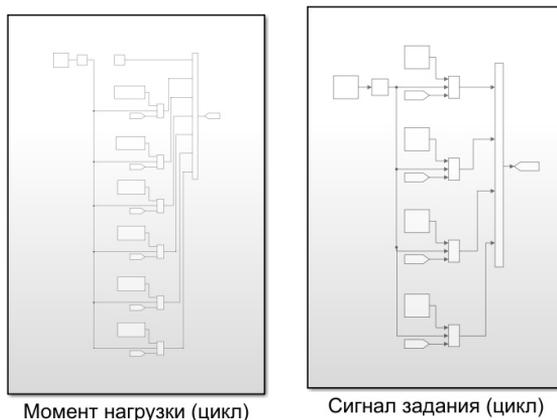


Рис. 18. Реализация режима работы ЭП

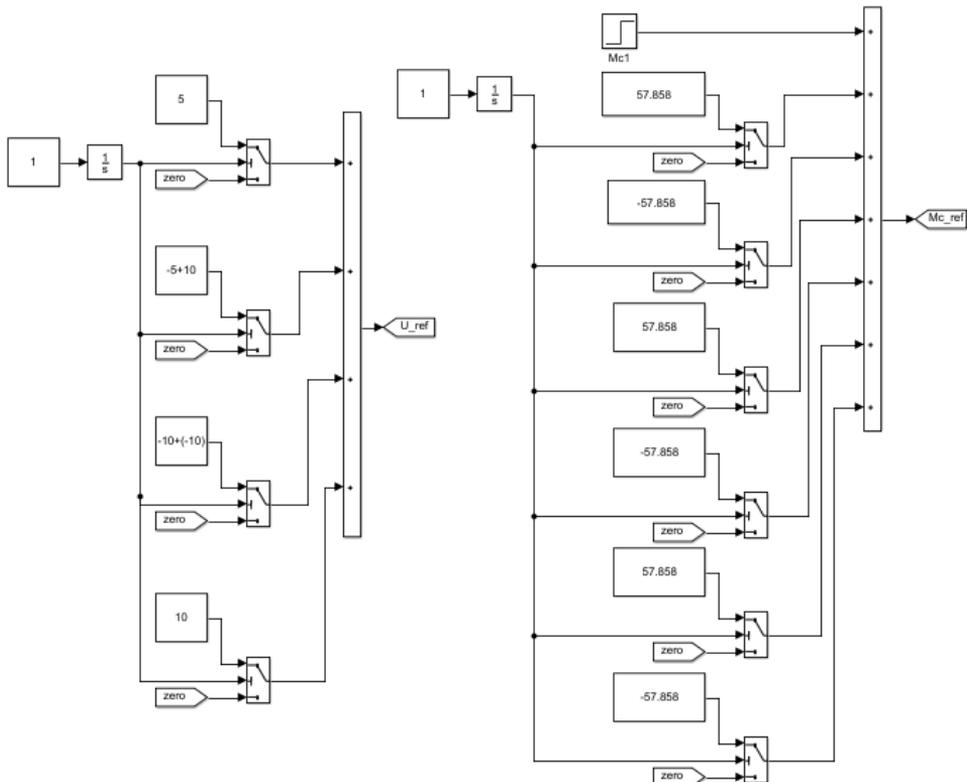


Рис. 19. Содержание подсистем реализации режима работы ЭП

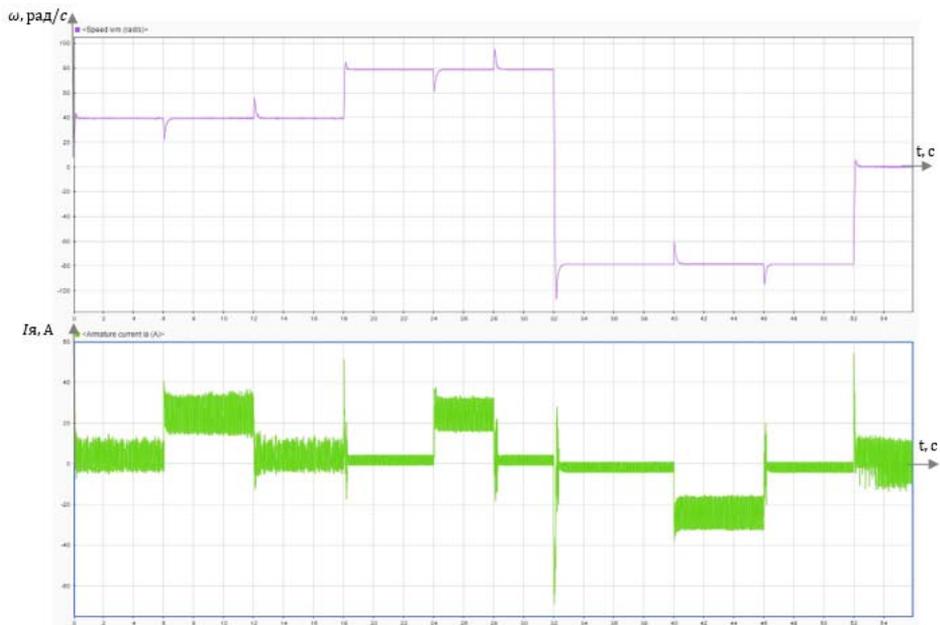


Рис. 20. Режим работы системы электропривода

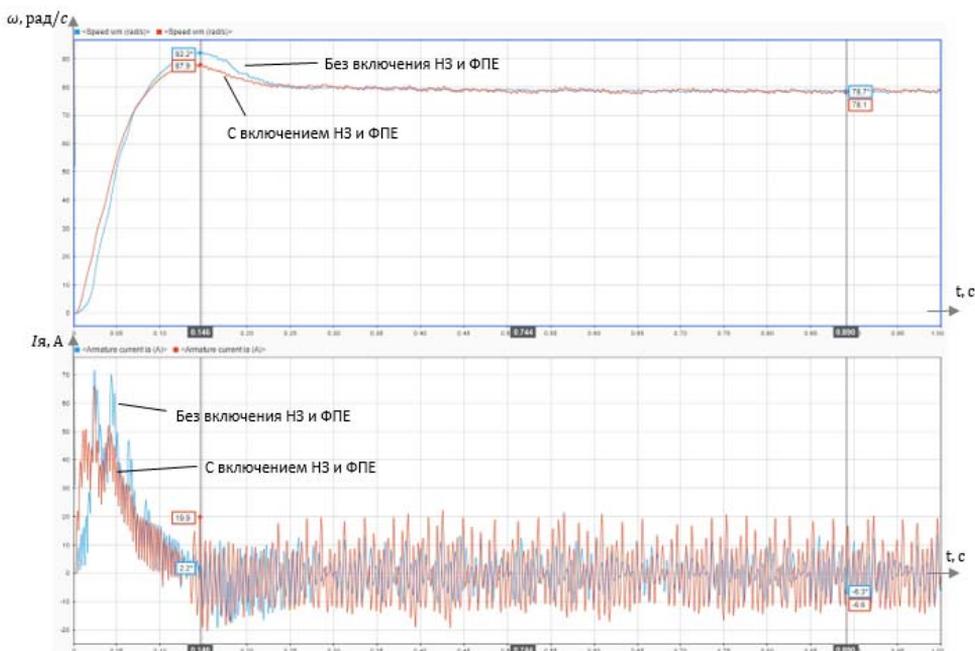


Рис. 21. Сравнение переходных процессов по скорости и току якоря без ФПЕ и НЗ и с их включением

Возникновение момента сопротивления приводит к увеличению сигнала управления на величину, пропорциональную току якоря. Этим увеличением компенсируется падение напряжения на активном сопротивлении якорной цепи, а частота вращения двигателя находится в зоне статической ошибки системы управления по скорости. Исходя из этих соображений в данной системе рассматривается работа функционального преобразователя ЭДС.

В данную систему также включено нелинейное звено, которое необходимо для того, чтобы обеспечить линейный закон управления в зоне прерывистых токов якоря.

Таким образом, по переходным процессам, значениям параметров можно сделать вывод о корректной работе преобразователя. В целом система регулируемого электропривода синтезирована верно.

Выводы. В данной статье были подробно проанализированы различные подходы известных авторов к моделированию полупроводниковых преобразователей в системах ЭП. У каждого из вариантов имеется большое количество достоинств, но существенным недостатком является, с одной стороны, сложность их экспериментальной реализации, а с другой – чрезмерное упрощение важных элементов или даже подсистем, что усложняет целостность восприятия подобных моделей.

В связи с этим был рассмотрен уточненный подход к моделированию полупроводниковых выпрямителей (на примере трехфазной мостовой схемы выпрямления), заключающийся в максимальном приближении структуры схемы модели к реальной реализации, учете всех элементов, входящих в структуру вентильного электропривода. Этот результат после окончательной

доработки можно использовать для проектирования реального силового преобразователя в условиях производственного предприятия.

Нужно отметить, что данная работа имеет лишь рекомендательно-методический характер. Она не отвергает известных методик синтеза имитационных моделей систем электропривода, разработанных другими авторами, в ней не навязываются какие-либо неоспоримые постулаты, а лишь предлагается уточненный подход к их моделированию. Более того, обобщив разные варианты их синтеза, можно прийти к разработке более совершенной методики.

Литература

1. *Борисов П.А., Томасов В.С.* Расчет и моделирование выпрямителей. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 169 с.
2. *Борисов П.А., Седнев А.К.* Математическое моделирование электропривода постоянного тока с активным выпрямителем // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского национального исследовательского университета. 2009. № 3(61). С. 35–41.
3. *Борисов П.А.* Расчет и моделирование режима периодического реверса скорости с токоограничением в электроприводе постоянного тока с шип // Конференция АЭП-2014 / Нац. иссл. мордовский гос. ун-т. Саранск, 2014. С. 155–160.
4. *Борисов П.А., Поляков Н.А., Киреев А.А.* Моделирование системы управления трёхфазным активным выпрямителем напряжения с преобразованием координат // Известия Тульского государственного технического университета. 2010. № 3-2. С. 59–64.
5. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: Корона принт, 2001. 320 с.
6. *Герман-Галкин С.Г.* Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2013. 448 с.
7. *Герман-Галкин С.Г., Звезжевич З.Ч., Поляков Н.А.* Аналитическое и модельное исследование активного полупроводникового преобразователя в системах электропривода // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского национального исследовательского университета. 2014. № 3(91). С. 131–139.
8. *Герман-Галкин С.Г.* Исследование активного выпрямителя в пакете Sim Power System // Известия высших учебных заведений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета. 2004. Т. 47, № 11. С. 64–67.
9. *Герман-Галкин С.Г.* Модельное исследование вторичного источника питания полупроводникового электропривода с рекуперацией энергии в сеть // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения 2010. № 4. С. 11–16.
10. *Герман-Галкин С.Г.* Активный выпрямитель в цепи электропитания // Транспорт Урала. 2011. № 4. С. 91–95.
11. *Лурье М.С., Лурье О.М.* Применение программы MATLAB при изучении курса электротехники. Красноярск: СибГТУ, 2006 – 208 с;
12. *Лурье М.С., Лурье О.М.* Электротехника. Нелинейные и несинусоидальные цепи, переходные процессы в линейных цепях. Красноярск: СибГТУ, 2011. 124 с.
13. *Лурье М.С., Лурье О.М., Вайс А.А.* Электротехника. Для студентов всех специальностей и форм обучения. Красноярск: СибГТУ, 2005. 131 с.
14. *Панкратов В. В.* Автоматическое управление электроприводами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. Ч. I. 200 с.
15. *Суптель А.А.* Моделирование систем управления электроприводами. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. 197 с.
16. *Томасов В.С., Борисов П.А.* Методика выбора способа использования энергии рекуперации в системах электропривода постоянного тока с шип // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского национального исследовательского университета. 2005. № 20. С. 85–90.
17. *Томасов В.С., Борисов П.А.* Анализ электромагнитных процессов при включении активных выпрямителей напряжения в питающую сеть // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского национального исследовательского университета. 2003. № 10. С. 218–222.
18. *Томасов В.С., Борисов П.А., Толмачев В.А.* Совершенствование энергетических показателей энергоподсистем электротехнических комплексов и систем с полупроводниковыми преобразователями // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского национального исследовательского университета. 2006. № 30. С. 19–26.

ЧЕРВОНЕНКО АНДРЕЙ ПАВЛОВИЧ – аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, Россия, Новосибирск (andrey-guitar@bk.ru).

КОТИН ДЕНИС АЛЕКСЕЕВИЧ – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, Россия, Новосибирск (d.kotin@corp.nstu.ru).

Andrey P. CHERVONENKO, Denis A. KOTIN

MODELING THYRISTOR TRANSDUCERS IN MATLAB ENVIRONMENT TAKING INTO ACCOUNT THE PECULIARITIES OF THEIR IMPLEMENTATION

Key words: electric drive, simulation of semiconductor rectifiers, thyristor transducer.

The authors present the study of synthesis methods for simulating the models of semiconductor rectifiers. Simulation of semiconductor rectifiers is quite studied today, but many authors carry out synthesis in their own unique way. The need to apply high technologies in variable speed drives with the development of mechanisms and working machines is growing, the automated variable speed drive is being introduced increasingly, making the energy substrate for aggregates and working machines. The relevance of this work is explained by the fact that currently developing technologies make it possible to manufacture more advanced semiconductor elements. The more relevant and significant is the study of refined digital models of electric drives containing semiconductor converters. This paper will summarize known approaches to the development of rectifiers' digital models, as well as it will offer the authors' own vision of this issue – taking into account as many individual features of semiconductor elements and the entire electric drive system as a whole as possible. The option proposed for consideration differs in that when developing in Matlab environment the parameters of real existing power elements and their digital analogues are consistent. The article also examines the issue of creating a digital model of the electric drive reverse system including a thyristor transducer and an engine; the transition characteristics of the refined model are illustrated. The result of this study is the analysis of different approaches to modeling semiconductor converters in electric drive systems. In this regard, a refined approach to modeling semiconductor rectifiers was considered, consisting of maximizing approximation of the model structure to real implementation, taking into account all elements, included in the structure of the ventilated electric drive. The study suggests that the developed simulation models can be used for the design of a real power converter in the conditions of a production enterprise.

References

1. Borisov P.A., Tomasov V.S. *Raschet i modelirovanie vypryamitelei* [Calculation and modeling of rectifiers. Manual for the course "Elements of automation systems"]. St. Petersburg, 2009, 169 p.
2. Borisov P.A. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivoda postoyannogo toka s aktivnym vypryamitelem* [Mathematical modeling of a DC electric drive with an active rectifier]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta*, 2009, no. 3(61), pp. 35–41.
3. Borisov P.A. *Raschet i modelirovanie rezhima periodicheskogo reversa skorosti s toko-ogranicheniem v elektroprivode postoyannogo toka s ship* [Calculation and simulation of the periodic speed reversal mode with current limitation in a DC electric drive with a spike]. In: *Konferentsiya AEP-2014 Nats. issl. mordovskii gos. un-t* [Conference Automated electric drive 2014 National Research Mordovian State University]. Saransk, 2014, pp. 155–160.
4. Borisov P.A. *Modelirovanie sistemy upravleniya trekhfaznym aktivnym vypryamitelem napryazheniya s preobrazovaniem koordinat* [Simulation of a three-phase active voltage rectifier control system with coordinate transformation]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3-2, pp. 59–64.
5. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in MATLAB 6.0]. St. Petersburg, Korona print Publ., 2001, 320 p.

6. German-Galkin S.G. *Virtual'nye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v srede matlab-simulink* [Virtual laboratories of semiconductor systems in the matlab-simulink environment]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013, 448 p.

7. German-Galkin S.G. *Analiticheskoe i model'noe issledovanie aktivnogo poluprovodnikovogo preobrazovatelya v sistemakh elektroprivoda* [Analytical and model study of an active semiconductor Converter in electric drive systems]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta*, 2014, no. 3(91), pp. 131–139.

8. German-Galkin S.G. *Issledovanie aktivnogo vypryamitelya v pakete sim power system* [Research of the active rectifier in the sim power system package]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Sankt-Peterburgskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta*, 2004, vol. 47, no. 11, pp. 64–67.

9. German-Galkin S.G. *Model'noe issledovanie vtorichnogo istochnika pitaniya poluprovodnikovogo elektroprivoda s rekuperatsiei energii v set'* [Model study of a secondary power source of a semiconductor electric drive with energy recovery in the network]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*, 2010, no. 4, pp. 11–16.

10. German-Galkin S.G. *Aktivnyi vypryamitel' v tsepi elektropitaniya* [Active rectifier in the power supply circuit]. *Zhurnal Transport Urala*, 2011, no. 4, pp. 91–95.

11. Lur'e M.S., Lur'e O.M. *Primenenie programmy MATLAB pri izuchenii kursa elektrotekhniki. Dlya studentov vseh spetsial'nostei i form obucheniya* [Application of the MATLAB program in the course of electrical engineering. For students of all majors and forms of study]. Krasnoyarsk, 2006, 208 p.

12. Lur'e M.S., Lur'e O.M. *Elektrotekhnika. Nelineinye i nesinusoidal'nye tsepi, perekhodnye protsessy v lineinykh tsepyakh* [Nonlinear and non-sinusoidal circuits, transients in linear circuits]. Krasnoyarsk, 2011, 124 p.

13. Lur'e M.S., Lur'e O.M., Vais A.A. *Elektrotekhnika. Dlya studentov vseh spetsial'nostei i form obucheniya* [Electrical engineering. For students of all specialties and forms of education]. Krasnoyarsk, 2005, 131 p.

14. Pankratov V.V. *Avtomaticheskoe upravlenie elektroprivodami: ucheb. posobie. Chast' I. Regulirovanie koordinat elektro-privodov postoyannogo toka* [Automatic control of electric drives: tutorial. Part I. Regulation of coordinates of DC electric drives]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2013, 200 p.

15. Suptel' A.A. *Modelirovanie sistem upravleniya elektroprivodami* [Modeling of electric drive control systems]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2010, 197 p.

16. Tomasov V.S. *Metodika vybora sposoba ispol'zovaniya energii rekuperatsii v sistemakh elektroprivoda postoyannogo toka s ship* [Method of selecting a method for using recovery energy in DC electric drive systems with a spike]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta*, 2005, no. 20, pp. 85–90.

17. Tomasov V.S. *Analiz elektromagnitnykh protsessov pri vklyuchenii aktivnykh vypryamitelei napryazheniya v pitayushchuyu set'* [Analysis of electromagnetic processes when switching on active voltage rectifiers in the supply network]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta*, 2003, no. 10, pp. 218–222.

18. Tomasov V.S. *Sovershenstvovanie energeticheskikh pokazatelei energopodsystem elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami* [Improving energy performance of power subsystems electrical complexes and systems with semiconductor converters]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta*, 2006, no. 30, pp. 19–26.

ANDREY P. CHERVONENKO – Post-Graduate Student of Electric Drive and Industry Automation Department, Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk (andreyguitar@bk.ru).

DENIS A. KOTIN – Candidate of Technical Sciences, Head of Electric Drive and Industry Automation Department, Novosibirsk State Technical University, Russia, Novosibirsk (d.kotin@corp.nstu.ru).

Формат цитирования: Червоненко А.П., Котин Д.А. Моделирование тиристорных преобразователей в среде Matlab с учетом особенностей их практической реализации // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 150–165. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-150-165.