

Моделирование системы управления цифрового импульсного источника напряжения

Н. К. Третьяков¹, Д. Н. Кокшаров²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

²ООО «Двинго»

¹nktretyakov@stud.etu.ru, ²info@dvingo.com

Аннотация. Работа посвящена вопросу точности построения имитационных моделей современных цифровых импульсных источников переменного напряжения в среде MATLAB Simulink, разработанных на базе современных микроконтроллеров, в частности, с применением микроконтроллеров фирмы Texas Instruments семейства C2000, имеющих жесткую архитектуру и последовательность работы периферийных устройств. В исследовании применяются методы структурного анализа, математического моделирования и натурных испытаний на макетном образце импульсного источника питания. В статье рассмотрены механизмы, принципы и последовательность функционирования системы управления, внедренной в микроконтроллер, а также возможность построения наиболее приближенной модели конечного устройства посредством применения стандартных блоков библиотек MATLAB Simulink. Приведены результаты математического моделирования и натурных испытания, подтверждающих целесообразность применения рассмотренной концепции проектирования моделей системы управления и устройств в целом.

Ключевые слова: моделирование; система управления; дискретность; импульсный источник питания

I. ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование современных инструментов (программ) комплексного моделирования позволяет рассчитывать, строить, а в последствии и анализировать наиболее адекватные и приближенные к реальным конечные модели устройств. Одним из основных инструментов моделирования преобразовательной техники сегодня является ПО MATLAB Simulink [1], имеющее графический редактор и множество функциональных библиотек. Необходимо отметить, что именно в отличии идеализированной модели и наиболее приближенной к реальному устройству заключается основная сложность проектирования.

Основным физическим компонентом системы управления реальным устройством является микроконтроллер, выполняющий задачи регулирования выходных параметров преобразователя и другие, второстепенные функции. В рамках задачи проектирования цифровой преобразовательной техники, работающей на частотах до сотни кГц, наиболее подходящим для реализации системы управления является использование микроконтроллеров фирм STMicroelectronics (ST), Texas instruments (TI), GigaDevice, Artery Technology и др., имеющих жесткую (фиксированную) структуру работы периферийных устройств: ШИМ (PWM), АЦП (ADC), обработчика прерываний (NVIC/IRQ) [2] и т.д. Описание работы периферийных устройств микроконтроллера, подробно рассмотренное в технической документации, позволяет

получить полноценное представление о последовательности и принципе работе, что делает возможным практически идентично построить модель системы управления и устройства в целом.

Целью исследования является создание наиболее приближенной модели импульсного источника переменного однофазного напряжения мощностью 1,5 кВт, где микроконтроллером системы управления является TMS320F28035 [3], для сокращения цикла разработки (уменьшения трудозатрат на пуско-наладочные работы).

II. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Основным принципом функционирования микроконтроллера, а в последствии и построения адекватной модели является дискретность и разрядность, ограничивающая скорость и точность выполнения математических операций, преобразований показаний АЦП, обработки событий и т.д. Учет данных ограничений, а также аппаратных механизмов работы периферийных устройств микроконтроллера позволяет построить наиболее приближенную модель.

Работа алгоритма (регулятора) системы управления выполняется циклично с фиксированным шагом равным частоте ШИМ, как правило, в прерывании (для устройств без частотной модуляции) [4]. На рис. 1 (пример приведен для микроконтроллеров фирмы STM) представлен принцип работы микроконтроллера, где ISR1/ISR2 являются прерываниями, где наибольшим приоритетом обладает ISR2.

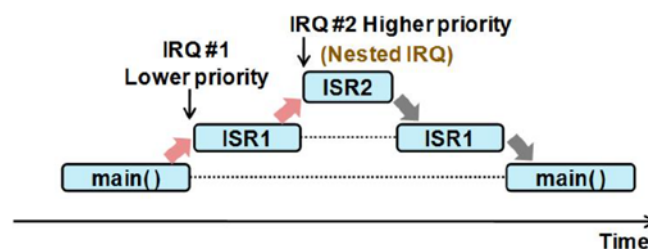


Рис. 1. Принцип работы прерываний в микроконтроллере

Существует множество вариаций формирования (выбора события для запуска) и последовательности прерываний в том числе разделения работы периферийных устройств микроконтроллера, применяемых в системе управления – АЦП и ШИМ. Авторы в своем исследовании придерживаются точки зрения, что изначально формируется событие (прерывания) ШИМ, где по определенному значению таймера выполняется запуск и обработка АЦП (рис. 2) [5].

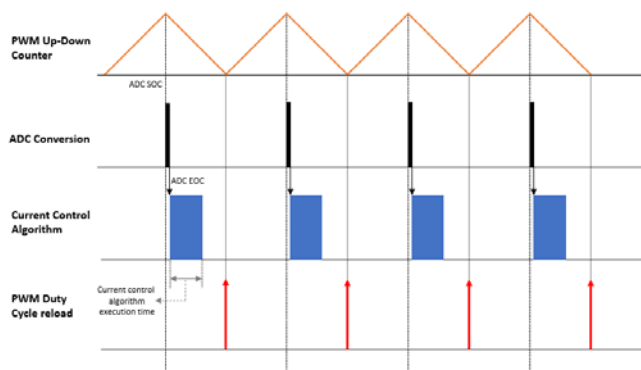


Рис. 2. Принцип формирования событий и функционирования периферии микроконтроллера (АЦП и ШИМ)

Исходя из рис. 2 при построении модели необходимо учитывать задержку в показаниях АЦП на один период ШИМ, т.к. обновления значения сигнала задания ШИМ (длительности импульса) выполняются до запуска АЦП [6]. Данный аспект не является ключевым в построении модели, но также влияет на конечный результат. Наибольшая сложность в построении модели с точки зрения работы АЦП заключается в повторении событий (временных точек), в которых выполняется обработка значений АЦП. Другими аспектами являются учет и повторения аппаратных механизмов функционирования модуля ШИМ микроконтроллера в модели. Наибольшее внимания требует учет «мертвого времени» – временной задержки между работой верхнего и нижнего ключа последовательно соединённых транзисторов, которая составляет от сотен нс до единиц мкс, когда оба ключа находятся в закрытом состоянии [7]. В описании микроконтроллеров фирмы TI данные задержки в зависимости от применения в начале или конце импульса называются RED (programmable delay to rising edges) и FED (programmable delay to falling edges) зонами (рис. 3).

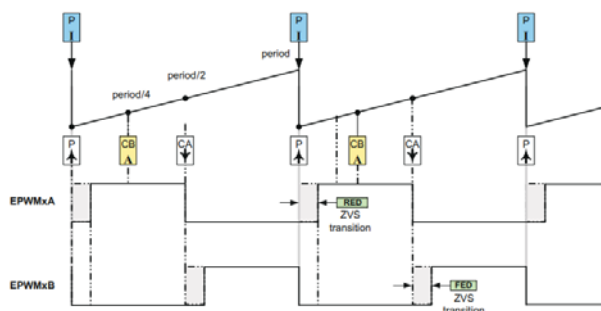


Рис. 3. Принцип автоматического формирования «мертвого времени» микроконтроллером

Данный механизм необходим для безопасной эксплуатации реального устройства (избежание сквозных токов полумоста), т.к. реальные транзисторы, в силу своей структуры, закрываются не мгновенно.

Важно подчеркнуть, что кроме учета принципов работы микроконтроллера в модели необходимо корректно настраивать работу (запуск и обработку событий) периферийных устройств реальной системы. Так, на практике наблюдается влияние переходных процессов (коммутация транзисторов) и паразитных параметров силовых цепей на работу АЦП [8]. На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения, подающегося на ногу канала АЦП микроконтроллера – верхняя (фиолетовая), ниже напряжений с

трансформатора тока (ТТ): зеленая – напряжение на нагрузочном резисторе ТТ, голубая – напряжение с ТТ после фильтра низких частот (RC – цепи).



Рис. 4. Осциллограммы влияния переходных процессов на показания АЦП микроконтроллера

Именно коммутационные выбросы непосредственно влияют на АЦП, т.к. вносят искажение в сигнал. Пунктирной прямой указаны места (измерения выполняются каждый период работы), соответствующие середине длительности открытого состояния транзистора, что является наиболее подходящим моментом для запуска и обработки АЦП. Остальные эффекты и процессы, связанные с эксплуатацией реального устройства и разбросом применяемых компонентов, являются практически невозможными к учету в силу сложности их оценки, а тем более реализации в модели.

Таким образом, для построения наиболее приближенной модели реального преобразователя необходимо учитывать (повторить) описанные механизмы работы периферийных устройств микроконтроллера, где основными является дискретность и задержки работы регуляторов системы управления, а также «мертвое время». Данные механизмы работы являются ключевыми при построении модели и позволяют наиболее адекватно повторить работу реального устройства, т.е. построить наиболее приближенную модель. Аналогичного внимания требует и конечная настройка периферии реального микроконтроллера для корректной обработки показания АЦП.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе объектом исследования является однофазный импульсный источник напряжения (DC/AC преобразователь), рассчитанный на продолжительный режим работы при мощности нагрузки равной 1,5 кВт. На рис. 5 представлена имитационная модель преобразователя в среде динамического моделирования Matlab Simulink R2020a.

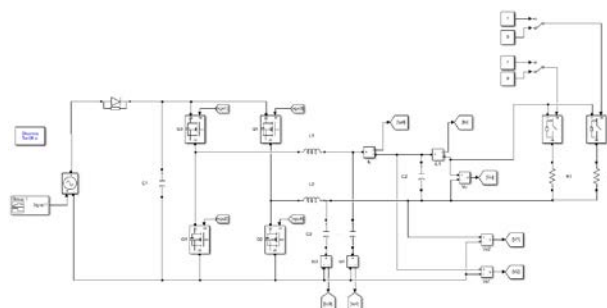


Рис. 5. Модель силовой части импульсного источника однофазного напряжения

Основными параметрами работы модели преобразователя являются: частота ШИМ 50 кГц; входное постоянное напряжение 360 В;

среднеквадратичное значение выходного переменного напряжения 220 В; частота выходного напряжения 50 Гц; сопротивление нагрузки R1 и R2 по 64 Ом; индуктивности выходного фильтра L1, L2 равны 380 мкГн; конденсатор выходного фильтра C2 равен 6 мкФ; конденсаторы C3 и C4 предназначены для снижения помех от работы транзисторов (применены в макетном образце преобразователя) и «фиксации» потенциала выходного фильтра и их емкость составляет 200 нФ. К контролируемым параметрам относятся качественные характеристики выходного переменного напряжения: среднеквадратичное значение, коэффициент гармонических искажений (THD) [9].

При построении модели авторы используют блоки библиотеки «Simscape/Electrical/Specialized Power Systems». Для работы модели необходимо применять блок «powergui», позволяющий установить общую дискретность вычисления системы. На рис. 6 приведены осциллограммы (напряжение и ток) работы одной и той же модели преобразователя при шаге дискретизации 5e-8 сек. (a) и 5e-6 сек. (b). Невооруженным взглядом видны искажения формы формируемого напряжения при меньшем шаге.

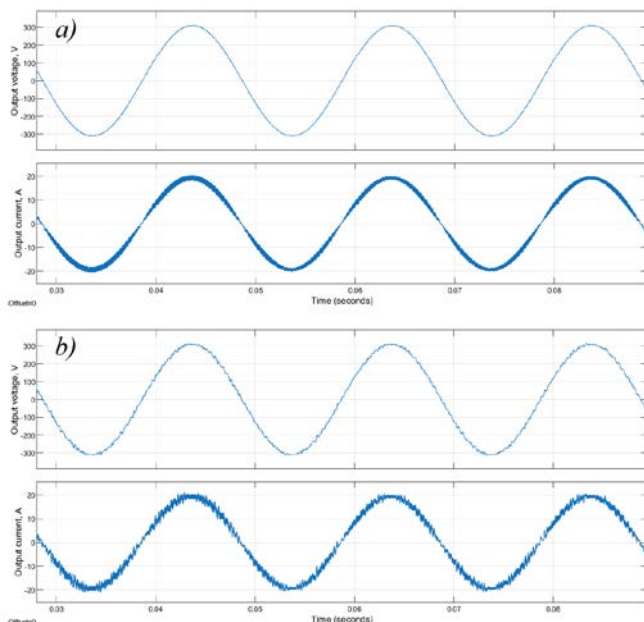


Рис. 6. Осциллограммы выходного тока и напряжения модели преобразователя при шаге дискретизации модели (Sample time) 5e-8 сек. (сверху) и 5e-6 сек. (снизу)

Ранее при рассмотрении принципов работы микроконтроллера были рассмотрены прерывания, т.е. дискретность работы регуляторов системы управления. Авторы считают, что шаг работы модели должен превышать частоту ШИМ, а следовательно, и системы управления на несколько порядков, в случае исследования – трех, что позволяет добиться эффекта наибольшей приближенности к реальному устройству. Уменьшение шага работы (вычисления) модели увеличивает расход ресурсов компьютера и время вычисления всей модели, но имеет последствия наглядно продемонстрированные на рис. 6.

Для имитации работы дискретности системы управления возможно применить блок «Function-Call Generator», имитирующий событие запуска прерывания (с частотой ШИМ) и использовать подсистему «Function-Call Subsystem», в которой реализована система

управления (рис. 7). Дискретность АЦП возможно повторить путем применения блока «Rate Transition» с установленным параметром «Output port sample time» (рис. 7).

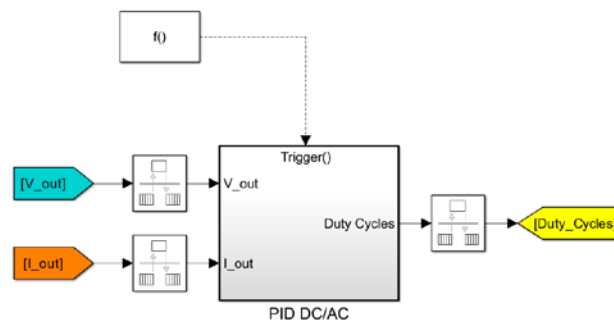


Рис. 7. Дискретная модель системы управления преобразователя

Заключительным вопросом является формирование «мертвого времени». Механизм формирования «мертвого времени» наиболее просто реализовать посредством применения блока «On/Off Delay», но важно отметить, что, если ссылаться на реальное устройство, данный блок будет имитировать RED зону (рис. 3), что не является полноценным воссозданием, но имеет аналогичное влияние на результаты моделирования [10].

IV. ПРАКТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

На рис. 8 представлен макетный образец DC/AC преобразователя с измерительным оборудованием для контроля качественных параметров выходного напряжения. Измерения проводились анализатором качества электроэнергии Chauvin Arnoux S.A. 8336 и цифровым осциллографом Micsig STO1104C Plus с полосой пропускания 100 МГц [11].

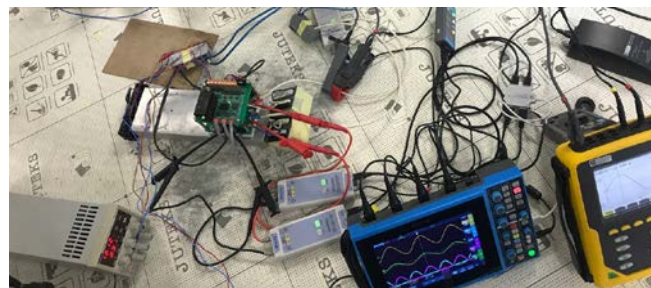


Рис. 8. Испытания макетного образца импульсного источника однофазного напряжения

Согласно полученным данным частота составила 49,97 Гц; среднеквадратичное значение напряжения – 219,9 В, THD – 0,3% (рис. 9).



Рис. 9. Осциллограммы выходного напряжения, тока и коэффициента гармоник макетного образца

Для измерения гармонической составляющей выходного напряжения в модели использовался блок «Spectrum Analyzer» библиотеки DSP System Toolbox /



Рис. 10. Осциллограммы блока «Spectrum Analyzer»

Согласно полученным результатам THD при измерении до 20 гармоника (аналогично анализатору качества электроэнергии Chauvin Arnoux C.A. 8336) составляет 0,2719%.

Таким образом, отличие результатов моделирования от практических испытаний составило менее чем 0,05 %.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило возможность построения наиболее точной имитационной модели импульсного преобразователя в среде MATLAB Simulink.

Рассмотренные и воспроизведенные в исследовании механизмы функционирования современных цифровых импульсных источников, построенных на базе микроконтроллеров с жесткой структурой периферийных устройств позволяют строить наиболее приближенные к реальным устройствам модели, что позволяет выполнить более детальный анализ функционирования и настройки регуляторов системы управления.

Результаты измерений выходного напряжения, полученные при математическом моделировании и натурных экспериментах, отличаются менее чем на 0,05 %.

Дальнейшие исследования направлены на анализ и воспроизведение в модели переходных процессов, возникающих в реальном устройстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Astapenko N.V. Analysis of the impact of genetic algorithm parameters on optimization efficiency in MATLAB // Bulletin of the M. Kozybayev NKU. 2025. No. 1(65). P. 207-214. DOI 10.54596/2958-0048-2025-1-207-214.

[2] Говоров Е. Микроконтроллеры семейства STM32MP1 компании STMicroelectronics // Электронные компоненты. 2022. № 5. С. 82-90.

[3] Толстых С.П. Цифровое управление трехфазным корректором коэффициента мощности / С.П. Толстых, Д.Д. Носков // Практическая силовая электроника. 2019. № 4(76). С. 49-56.

[4] Третьяков Н.К., Кузьменко В.П., Рысин А.В., Романова М.С. Имитационное моделирование источников переменного тока // Наука и бизнес: пути развития». 2024. № 4(154). С. 106-110.

[5] Кураев И. Проектирование высокопроизводительных ЦАП с ШИМ для промышленных приложений // Электронные компоненты. 2021. № 3. С. 64-69.

[6] Control system modeling and simulation for active filters of the high-frequency harmonics / N. Tretyakov, A. Bobryshov, V. Kuzmenko, O. Solenaja // Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2023. Vol. 6, No. 1. P. 434-439.

[7] Стариков А.В. Влияние величины «мертвого» времени на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя / А.В. Стариков, О.С. Беляева, Д.А. Пудовкина // Вопросы электротехнологии. 2023. № 1(38). С. 75-82.

[8] Третьяков Н.К. Метод юстировки абсолютного датчика положения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами и распределенной обмоткой / Н.К. Третьяков, В.Е. Кузнецов, П.В. Ренья // Электричество. 2025. № 6. С. 59-69. DOI 10.24160/0013-5380-2025-6-59-69.

[9] Adel B. Evaluation of pulse width modulation techniques to reduce total harmonic distortion in grid-connected PV systems / B. Adel, M. Tarek, K. Samia // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 564. DOI 10.11591/ijpeds.v16.i1.pp564-574.

[10] Кромм А.А. Высокоточная компенсация «мертвого времени» в электрических приводах на базе сигнальной адаптации / А.А. Кромм, Г.М. Симаков, А.Е. Гусев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2023. № 2(59). С. 16-28. DOI 10.17212/1727-2769-2023-2-16-28.

[11] Третьяков Н.К. Проектирование источников однофазного переменного напряжения // Практическая силовая электроника. 2024. № 4(96). С. 47-51.

[12] Алисултанова Э.Д. Ускорение обработки сигналов в simulink с использованием потока данных / Э.Д. Алисултанова, Х.М. Бапаева // Digital Era: Материалы I Всероссийской научно-практической конференции, Грозный, 26 марта 2021 года / Хасухаджиев А.С.-А. Грозный: Чеченский государственный университет, 2021. С. 23-30. DOI 10.36684/38-2021-1-23-30.