Модулятор цифровой системы управления силовым преобразователем энергопреобразующего комплекса малого космического аппарата

Поддубный Михаил Михайлович
Инженер НИИ КТ, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, podsubnuy609@gmail.com

Статья посвящена разработке цифрового модулятора системы управления силовым преобразователем энергопреобразующего комплекса (ЭПК) малого космического аппарата (МКА). Обоснован переход от традиционных аналоговых систем управления к прямому цифровому управлению на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС); показаны преимущества такого подхода: гибкость алгоритмов, высокое быстродействие контуров обратной связи и снижение массогабаритных характеристик. Приведены структурная и функциональная схемы ЭПК, раскрыт принцип работы силового модуля на основе четырёхключевого повышающе-понижающего преобразователя (ЧППП) с мягкой коммутацией транзисторов (ZVS), совмещающего функции стабилизатора напряжения шины и зарядного устройства аккумуляторной батареи. Показана возможность формирования управляющих сигналов с частотой до 500 кГц для реализации режимов мягкой коммутации. Новизна работы состоит в реализации на ПЛИС цифрового модулятора силового преобразователя, обеспечивающего мягкую коммутацию и совмещение в одном модуле функций стабилизации напряжения и заряда аккумуляторной батареи.

Ключевые слова: модулятор, четырёхключевой повышающе-понижающий преобразователь, цифровая система управления, ПЛИС, FPGA, ШИМ, ZVS, энергопреобразующий комплекс, малый космический аппарат.

Введение

В современных системах электропитания малых космических аппаратов (МКА) требуется одновременно повышать эффективность преобразования энергии и снижать массу и габариты аппаратуры. Перспективной топологией энергопреобразующего комплекса (ЭПК) является четырёхключевой повышающе-понижающий преобразователь (ЧППП), стабилизирующий выходное напряжение как при превышении, так и при снижении входного напряжения относительно заданного уровня [2, 5, 7].

Применение ЧППП особенно актуально из-за изменения напряжения солнечной батареи под действием температуры, освещённости, деградации фотоэлементов и режима работы. Для кремниевых элементов изменение входного напряжения относительно напряжения холостого хода может достигать 57 %, для арсенида галлия — 31 %. Поэтому согласование напряжений солнечной батареи, аккумуляторной батареи (АБ) и шины Bus является одной из основных задач ЭПК [1, 3].

Цель работы — разработка цифрового модулятора системы управления силовым преобразователем ЭПК МКА на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

Сравнение аналоговых и цифровых систем управления

Аналоговые системы управления на операционных усилителях и ШИМ-контроллерах отличаются простотой, высоким быстродействием и отработанностью. Однако их алгоритм задаётся аппаратно: изменение функций, масштабирование и настройка требуют переработки схемы. Кроме того, сложные алгоритмы — зонное распределение мощности, мажоритарное резервирование, поиск точки максимальной мощности и табличные характеристики — реализуются ограниченно [1, 3].

Цифровое управление на микроконтроллерах или ПЛИС позволяет изменять алгоритмы программно, обеспечивать повторяемость характеристик, реализовывать адаптивные функции и модернизировать систему без изменения аппаратной части. Недостатками являются дискретизация и квантование сигналов, а также более высокая сложность верификации; они компенсируются выбором частоты дискретизации и разрядности вычислений [6].

Серийные решения с фиксированной цифровой или аналоговой логикой, например модули семейства Vicor PRM/PI374x, не обеспечивают требуемой гибкости для ЭПК МКА, где необходимы зонное управление параллельными модулями, мажоритарный выбор управляющего воздействия и цифровая телеметрия.

Переход к прямому цифровому управлению на ПЛИС обусловлен возможностью программной реализации MPPT, зонного управления, резервирования и цифрового обмена. Управление ЧППП по входному току с ZVS требует пересчёта длительностей импульсов на каждом такте и использования табулированной регулировочной функции, что удобно реализовать на ПЛИС [5, 7]. Высокое быстродействие также позволяет повысить частоту контуров регулирования и уменьшить требуемую ёмкость выходного фильтра.

Цифровой модулятор с частотой переключения до 500 кГц обеспечивает быстродействие, сопоставимое с аналоговыми ШИМ-контроллерами, а параллельная реализация мажоритарного выбора и резервирования ограничивает задержку одним тактом опорного генератора [1]. Поэтому в работе выбрано прямое цифровое управление на ПЛИС.

Структурная и функциональная схемы энергопреобразующего комплекса

ЭПК преобразует энергию солнечной батареи (БС) для формирования напряжения шины Bus и поддержания заряда АБ. Система построена по модульному принципу: силовые модули CM1…CMN подключаются к общей шине, а аккумулятор подключается к Bus при недостатке генерируемой мощности. Общая система управления поддерживает напряжение шины на 0,2 В выше напряжения АБ.

Модульная архитектура повышает отказоустойчивость, позволяет масштабировать мощность, распределяет тепловую нагрузку и способствует повышению КПД [3]. Диапазон мощности нагрузки разделён на N+1 зон: при росте нагрузки силовые модули последовательно переходят из режима заряда АБ в режим поддержания напряжения шины.

Для уменьшения потерь в дополнительных коммутирующих ключах применяются ключи синхронного выпрямителя. В результате силовой преобразователь регулятора солнечной батареи реализуется на основе ЧППП с мягким переключением (рисунок 2; далее схема приведена на рисунке 3) [2, 4]. Входом служит солнечная батарея, а выходом — АБ или шина Bus.

Принцип работы силового преобразователя

При коммутации через транзисторы протекает ток обратного направления, обеспечивая включение при нулевом напряжении (ZVS). Это уменьшает динамические потери и электромагнитные помехи и повышает КПД [2, 4, 5,

7, 9]. В ЭПК регулируется входной ток: на модулятор поступает заданное значение I_З, а система управления рассчитывает длительности D1 и D2, необходимые для получения требуемого среднего тока и ZVS.

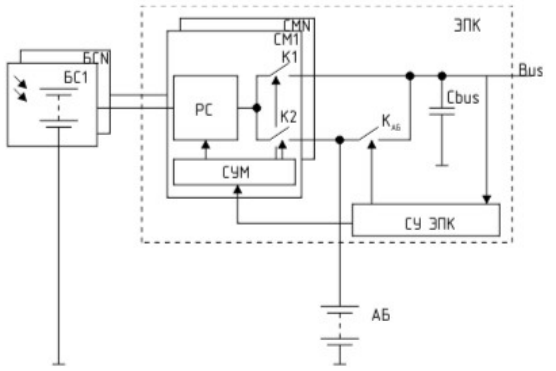


Рисунок 1 – Структурная схема энергопреобразующего комплекса

Работа преобразователя рассматривается в режимах псевдокритического постоянного тока (PCRM), при котором D1+D2+D3=D_max, и псевдопрерывистого тока (PDCM), при котором эта сумма меньше D_max. При U_IN>U_OUT изменяются D2 и D3, а D1 определяется рабочей точкой и минимальным током коммутации I_SW; при U_IN<U_OUT изменяются D1 и D2. Ток I_SW измеряется шунтом нижнего ключа и подаётся на компаратор.

Если заданный ток превышает максимально возможный для текущих U_IN и U_OUT ток I_max, преобразователь переводится в режим насыщения и стабилизирует входной ток на уровне I_max. Блок вычислений передаёт контроллеру экстремального регулирования признак режима М.

Один силовой модуль совмещает функции стабилизатора выходного напряжения и зарядного устройства АБ. Сигнал ММ выбирает выходную цепь: при ММ=0 энергия передаётся в АБ, при ММ=1 — в Bus. Модуль может работать в режимах поиска максимальной мощности с зарядом АБ, регулирования мощности заряда, регулирования мощности нагрузки и поиска максимальной мощности с передачей энергии в нагрузку. Совмещение функций уменьшает число отдельных узлов и массогабаритные характеристики ЭПК [1, 3, 8, 10].

Функциональная схема силового модуля и переход к модулятору

Функциональная схема ЭПК приведена на рисунке 3. В состав входят четыре силовых модуля МС1…МС4 и модуль управления МУ. Каждый силовой модуль содержит ЧППП и цифровую систему управления на ПЛИС с датчиками тока и напряжения, АЦП, блоком вычислений, буферным усилителем, контроллером экстремального регулирования и ПЗУ для табулированной регулировочной функции.

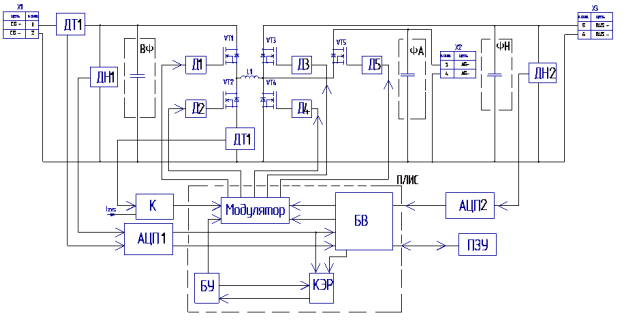


Рисунок 3 – Функциональная схема ЭПК

Управляющие сигналы силовых ключей формирует модулятор М на основании D1, D2, режима ММ и сигнала токового компаратора. Длительности D1 и D2 рассчитываются блоком вычислений по заданному току I_З, измеренным U_IN и U_OUT и табулированной функции. Сигнал I_З формируется по управляющему воздействию, полученному мажоритарным выбором трёх каналов управления.

Датчики, АЦП, блок вычислений, буферный усилитель и контроллер экстремального регулирования формируют параметры, необходимые модулятору: D1, D2 и ММ. Модулятор является выходным звеном цифровой системы управления: он не рассчитывает регулировочные величины, а преобразует их в последовательность импульсов управления силовыми транзисторами с учётом I_SW и защитных пауз.

К модулятору предъявлены требования: согласованное управление VT1…VT5; частота переключения 100–500 кГц; пауза между транзисторами одной стойки не менее 300 нс; приём D1 и D2 только в начале периода; выбор выходной цепи сигналом ММ; завершение интервала мягкой коммутации по I_S; исключение сквозных токов и паразитных импульсов; совместимость модели с HDL Coder и задержка формирования выходных сигналов не более одного такта.

Разработка и реализация цифрового модулятора

Модулятор М формирует импульсы управления VT1…VT5. На входы поступают ММ, сигнал внешнего компаратора тока I_S, длительности D1 и D2 и тактовый сигнал Clk. Функциональная схема модулятора приведена на рисунке 4.

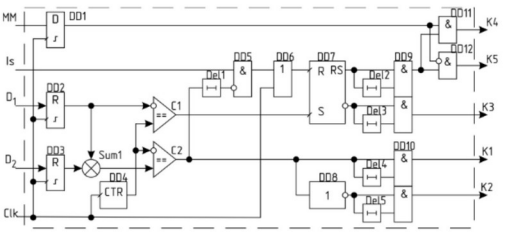


Рисунок 4 – Функциональная схема цифрового модулятора

Тактируемые регистры DD2, DD3 и D-триггер DD1 принимают ММ, D1 и D2 только в начале периода. Счётчик DD4 формирует линейно нарастающий цифровой сигнал для компараторов C1 и C2; на их вторые входы подаются D1 и D1+D2. Порог счётчика задаёт частоту переключения 50–600 кГц. Задержка в обратной связи исключает алгебраическую петлю при генерации HDL-кода [6].

Выход C2 управляет K1, а его инверсия — K2. Выход C1 устанавливает RS-триггер DD7, управляющий K4 либо K5 в зависимости от ММ; инверсный выход управляет K3. Сброс DD7 выполняется по I_S или по окончании периода, что предотвращает зависание при отсутствии срабатывания компаратора. При ММ=0 энергия передаётся в АБ через K5, при ММ=1 — в Bus через K4.

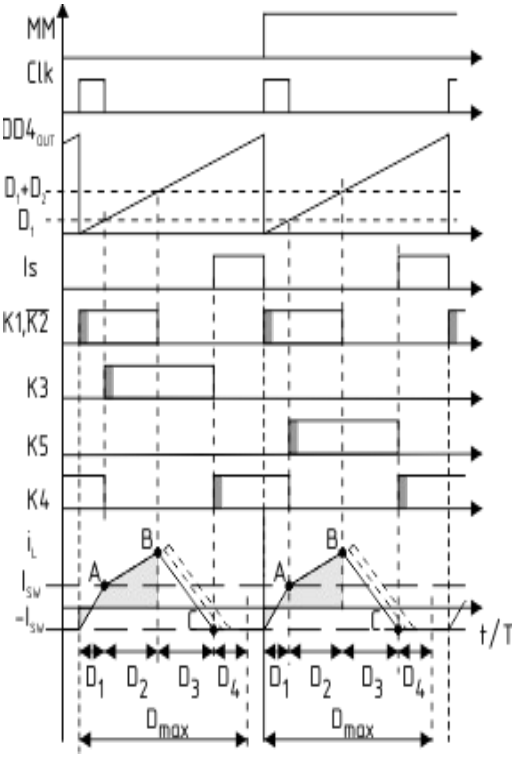


Рисунок 5 – Диаграммы работы модулятора и тока дросселя ЧППП

Для предотвращения сквозных токов применены блоки задержки Del1…Del5 и логические элементы DD5, DD6, DD9…DD12. Включение каждого транзистора разрешается только после выдержки заданного числа тактов. Это обеспечивает требуемую паузу между выключением одного и включением другого транзистора стойки независимо от разброса времени выключения GaN-транзисторов.

Логика распределения импульсов формирует состояния четырёх основных ключей по интервалам периода. Пятый ключ VT5 включается при ММ=0 и обеспечивает передачу энергии солнечной батареи в аккумуляторную батарею.

Таблица 1
Состояния силовых ключей по интервалам периода

Интервал	VT1	VT2	VT3	VT4
Интервал 1	1	0	0	1
Интервал 2	1	0	1	0
Интервал 3	0	1	1	0
Интервал 4	0	1	0	1

Модель модулятора в MATLAB/Simulink построена из логических элементов, регистров и типов boolean/fixdt, совместимых с последующим синтезом HDL-кода. Verilog-код сформирован средствами HDL Coder [6]. Для ПЛИС Gowin задаётся целевой язык описания, после чего код адаптируется в САПР производителя. Минимальная разрядность и режим округления Simplest позволяют сократить аппаратные ресурсы.

В качестве управляющего устройства выбрана ПЛИС семейства Gowin со встроенной User Flash для хранения табулированной функции. Критериями выбора были объём памяти, частота PLL, компактный корпус QFN-48, питание 1,8–3,6 В и расширенный температурный диапазон. На макетном образце применена GW1NSR-LV4CQN48PC7/I6.

После синтеза и размещения проекта в среде Gowin FPGA Designer формируется файл конфигурации ПЛИС, который загружается в микросхему через отладочный интерфейс. Это обеспечивает реализацию разработанного модулятора в составе цифровой системы управления. Осциллограмма выходных импульсов модулятора при частоте 100кГц приведена на рисунке 6.

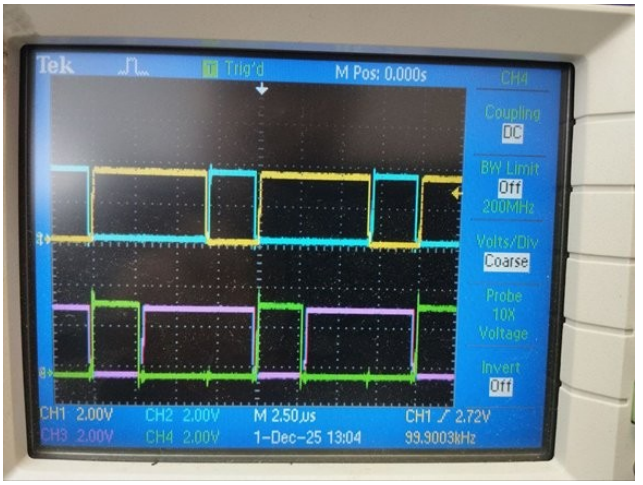


Рисунок 6 – Осциллограмма выходных импульсов модулятора

Заключение

Разработан цифровой модулятор системы управления силовым преобразователем ЭПК МКА на ПЛИС. Обоснован переход от аналогового управления к прямому цифровому управлению, обусловленный требованиями гибкости алгоритмов, быстродействия и снижения массогабаритных характеристик.

Рассмотрены архитектура ЭПК и принцип работы ЧППП, совмещающего функции стабилизатора выходного напряжения и зарядного устройства АБ. Показана связь измерительных каналов, блока вычислений и модулятора, который формирует управляющие импульсы силовых ключей.

Литература

1. Кабиров В. А., Семенов В. Д., Сухоруков М. П., Поддубный М. М. Цифровая система управления четырехключевым повышающе-понижающим преобразователем для энергопреобразующего комплекса малого космического аппарата // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: тез. докл. Отраслевой науч.-техн. конф. – Железногорск, 2025. – С. 76-77.
2. Осипов А. В., Сулайманов А. О., Дандаров В. Д., Зинченко И. Способы управления непосредственным повышающе-понижающим преобразователем с ZVS-включением транзисторов // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: тез. докл. Отраслевой науч.-техн. конф. – Железногорск, 2025. – С. 92-94.
3. Семенов В. Д., Кабиров В. А., Лушпин Г. А. Модульная структура энергопреобразующего комплекса МКА с нестабилизированным выходным напряжением // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: тез. докл. Отраслевой науч.-техн. конф. – Железногорск, 2025. – С. 97-98.
4. Сухоруков М. П., Осипов А. В. Преобразователи с мягким переключением для систем электропитания космических аппаратов. Опыт НИИ космических технологий ТУСУР // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: тез. докл. Отраслевой науч.-техн. конф. – Железногорск, 2025. – С. 99-100.
5. Yang F., Guo W., Zheng D., Ruan X., Yao K., Gu L. A Constant Switching Frequency Real-Time Digital Control for ZVS Four-Switch Buck-Boost Converter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2025. – Vol. 40, No. 7. – P. 9649-9660. – DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3547755.
6. MathWorks. Simulink HDL Coder: User's Guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2025.
7. Waffler S., Kolar J. W. A Novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power Bidirectional Buck+Boost Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 6. – P. 1589-1599. – DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2015881.
8. Young C.-M., Chen M.-H., Lin C.-H., Li K.-H. Design and Implementation of a High-Efficiency Bidirectional DC–DC Converter for Battery Energy Storage Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Vol. 62, No. 7. – P. 4126-4135. – DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2386796.
9. Higa H., Sagawa A., Itoh J. Improvement of Light Load Efficiency for Buck–Boost DC–DC Converter with ZVS Using Switched Auxiliary Inductors // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2018. – P. 1-8.
10. Liu Y., Zhang J., Wu X., Qian Z. Digital Control and Efficiency Optimization of Bidirectional DC–DC Converters for Energy Storage Applications // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36, No. 9. – P. 10241-10252. – DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3056932.

Modulator for the Digital Control System of a Power Converter in the Power Conversion Unit of a Small Spacecraft

Poddubny M.M.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

This article focuses on the development of a digital modulator for the control system of a power converter within the power conversion unit (PCU) of a small spacecraft. The transition from traditional analog control systems to direct digital control implemented on an FPGA is justified, and the advantages of this approach—algorithm flexibility, high-speed feedback loops, and reduced size and weight—are demonstrated. Structural and functional diagrams of the PCU are presented, and the operating principle of the power module is described; this module is based on a four-switch buck-boost converter with zero-voltage switching (ZVS) and combines the functions of a bus voltage regulator and a battery charger. The feasibility of generating control signals at frequencies up to 500 kHz to achieve soft-switching modes is demonstrated. The novelty of the work lies in the FPGA-based implementation of a digital modulator for the power converter, which ensures soft switching and integrates voltage regulation and battery charging functions into a single module.

Keywords: modulator, four-switch buck-boost converter, digital control system, FPGA, PWM, ZVS, power conversion unit, small spacecraft.

References

1. Kabirov V. A., Semenov V. D., Sukhorukov M. P., Poddubny M. M. Digital control system for a four-switch buck-boost converter for the power conversion unit of a small spacecraft // Development, Production, Testing, and Operation of Spacecraft and Systems: Abstracts of the Industry Scientific and Technical Conference. – Zheleznogorsk, 2025. – P. 76–77.
2. Osipov A. V., Sulaymanov A. O., Dandarov V. D., Zinchenko I. Control methods for a direct buck-boost converter with ZVS transistor switching // Development, Production, Testing, and Operation of Spacecraft and Systems: Abstracts of the Industry Scientific and Technical Conference. – Zheleznogorsk, 2025. – P. 92–94.
3. Semenov V. D., Kabirov V. A., Lushpin G. A. Modular structure of a small spacecraft power conversion unit with unregulated output voltage // Development, Production, Testing, and Operation of Spacecraft and Systems: Abstracts of the Industry Scientific and Technical Conference. – Zheleznogorsk, 2025. – P. 97–98.
4. Sukhorukov M. P., Osipov A. V. Soft-switching converters for spacecraft power supply systems: Experience of the TUSUR Research Institute of Space Technologies // Development, Production, Testing, and Operation of Spacecraft and Systems: Abstracts of the Industry Scientific and Technical Conference. – Zheleznogorsk, 2025. – P. 99–100. 5. Yang F., Guo W., Zheng D., Ruan X., Yao K., Gu L. A Constant Switching Frequency Real-Time Digital Control for ZVS Four-Switch Buck-Boost Converter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2025. – Vol. 40, No. 7. – P. 9649-9660. – DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2025.3547755.
6. MathWorks. Simulink HDL Coder: User's Guide. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2025.
7. Waffler S., Kolar J. W. A Novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power Bidirectional Buck+Boost Converters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, No. 6. – P. 1589-1599. – DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2015881.