Имитационная модель двухфазного синхронного понижающего преобразователя для зарядного устройства аккумуляторной батареи

Дандаров Вадим Дмитриевич
инженер, Инженерно-исследовательского центра космических технологий, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, dandarovvd03@gmail.com

В работе представлено исследование имитационной модели зарядного устройства аккумуляторной батареи малого космического аппарата, построенного на основе двухфазного синхронного понижающего преобразователя. Модель разработана в среде MATLAB/Simulink и предназначена для анализа электромагнитных процессов в силовой части, проверки алгоритма управления с чередованием фаз на 180°, исследования режима мягкой коммутации ZVS, синтеза PI-регулятора внутреннего контура тока и оценки динамического поведения преобразователя при изменении входного напряжения солнечной батареи. Рассмотрены режимы стабилизации зарядного тока CC и стабилизации напряжения CV, а также переходные процессы при скачкообразном изменении входного напряжения в диапазоне 38–76 В. Показано, что двухфазная структура обеспечивает снижение пульсаций суммарного выходного тока, а система управления сохраняет устойчивость при изменении параметров источника питания. Результаты моделирования подтверждают возможность применения разработанной модели при проектировании зарядного устройства для литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи LiFePO4.

Ключевые слова: зарядное устройство, аккумуляторная батарея, LiFePO4, малый космический аппарат, двухфазный синхронный понижающий преобразователь, MATLAB/Simulink, CC/CV, ZVS, PI-регулятор, солнечная батарея.

Работа выполнена в рамках проекта: исследование методов и технологий создания информационно-телекоммуникационных систем радиомониторинга и связи, их компонентов и узлов, на основе численных и экспериментальных методов анализа электромагнитных сигналов и физических явлений в твердом теле (FEWM-2026-0007).

Введение

В системах электропитания малых космических аппаратов зарядное устройство аккумуляторной батареи работает при изменяющихся параметрах солнечной батареи, что предъявляет требования к устойчивости системы регулирования и эффективности силового преобразования [12]. Для снижения пульсаций выходного тока и распределения токовой нагрузки между силовыми элементами могут применяться многофазные понижающие преобразователи с чередованием фаз [1, 2, 8].

В работе рассматривается двухфазный синхронный понижающий преобразователь с частотой коммутации 500 кГц и сдвигом фаз 180°. Система управления реализует алгоритм заряда CC/CV [3–7], а снижение коммутационных потерь обеспечивается формированием условий мягкого переключения ZVS [9–11]. Целью работы является разработка и исследование имитационной модели зарядного устройства в MATLAB/Simulink, включая анализ режимов CC/CV, коммутационных процессов, синтез PI-регулятора внутреннего контура тока и оценку устойчивости при изменении входного напряжения в диапазоне 38–76 В.

1. Имитационная модель и система управления зарядным устройством

Имитационная модель зарядного устройства разработана в MATLAB/Simulink и включает двухфазный синхронный понижающий преобразователь, ШИМ-модулятор со сдвигом фаз 180°, модель аккумуляторной батареи 6S, контроллер CC/CV и внутренний контур стабилизации тока. Силовая часть модели приведена на рис. 1.

Каждая фаза преобразователя содержит верхний и нижний силовые ключи и фазный дроссель; выходы фаз объединены на общем выходном конденсаторе. Противофазная работа каналов обеспечивает частичную компенсацию переменных составляющих фазных токов и снижение пульсаций суммарного выходного тока [1, 2, 8]. Основные параметры модели приведены в табл. 1.

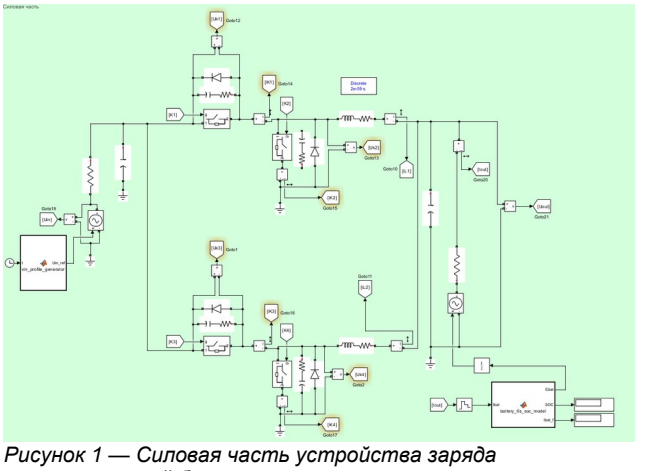


Рисунок 1 — Силовая часть устройства заряда аккумуляторной батареи

Основные параметры силовых элементов имитационной модели приведены в таблице 1.

Таблица 1
Основные параметры силовых элементов имитационной модели

№	Параметр	Обозначение	Значение
1	Частота коммутации одной фазы	fsw	500 кГц
2	Эффективная частота пульсаций	feff	1 МГц
3	Индуктивность дросселя фазы	L	1,1 мкГн
4	Активное сопротивление дросселя	RL	5 мОм
5	Ёмкость выходного конденсатора	Cout	100 мкФ

6	ESR выходного конденсатора	ESR	5 мОм
7	Сопротивление открытого канала ключей	RDS(on)	3,2 мОм
8	Выходная ёмкость ключа	Coss	890 пФ
9	Сдвиг фаз	—	180°
10	Внутреннее сопротивление АБ 6S	RАБ	30 мОм
11	Диапазон входного напряжения	Vin	38–76 В
12	Диапазон выходного напряжения	Vout	18–25,2 В
13	Максимальный выходной ток	Iout	22 А

2. Система управления и алгоритм CC/CV

Система управления приведена на рис. 2. Для каждой фазы используется опорный сигнал частотой 500 кГц, причём сигнал второй фазы сдвинут на половину периода. Управляющий сигнал сравнивается с соответствующей опорной пилой, формируя сигналы верхнего и нижнего ключей. Между их переключениями вводится dead-time, необходимый для исключения сквозного тока и формирования условий ZVS [9–11].

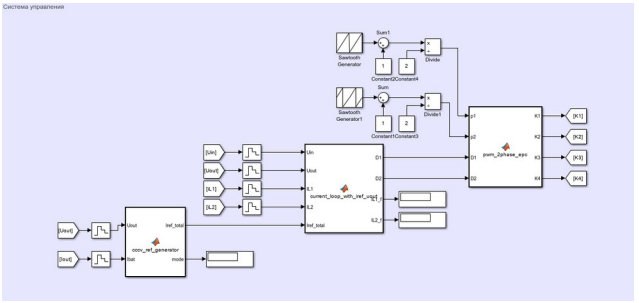


Рисунок 2 — Система управления устройством заряда аккумуляторной батареи

Заряд аккумуляторной батареи осуществляется по алгоритму CC/CV [3–7]. В режиме CC внутренний контур поддерживает заданный ток I_{ref}. После достижения напряжения $U_{CV}=25{,}2$В приоритет переходит к контуру стабилизации напряжения, который уменьшает зарядный ток.

Управляющее воздействие определяется выражением:

$$d(t)=\min\{K_{pI}e_I+K_{iI}\int e_I dt;\ K_{pV}e_V+K_{iV}\int e_V dt\}$$

Такая структура обеспечивает автоматический переход между режимами стабилизации тока и напряжения.

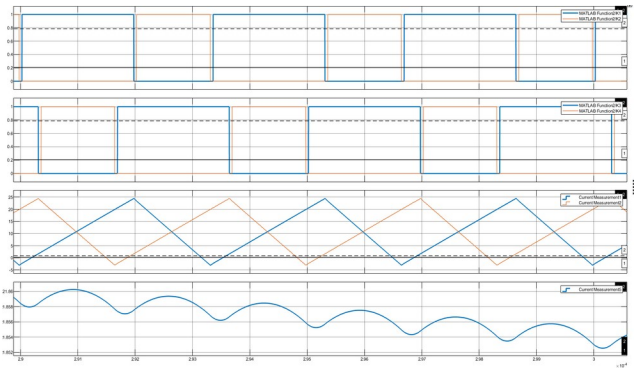


Рисунок 3 — Диаграммы ШИМ-модулятора: опорные пилы, управляющие импульсы, токи фаз и суммарный ток

Полученные диаграммы управляющих сигналов и токов фаз представлены на рис. 3.

3. Исследование режимов стабилизации тока и напряжения

Работа внутреннего контура исследована при $V_{in}=50$В и заданном зарядном токе $I_{ref}=22$А. В установившемся режиме среднее значение выходного тока соответствует заданию (рис. 4). Токи фаз сдвинуты на 180°, вследствие чего их переменные составляющие частично компенсируются и пульсации суммарного тока уменьшаются [1, 2, 8]. Фазные и суммарный токи приведены на рис. 4.

При увеличении напряжения аккумуляторной батареи до 25,2В система переходит из режима CC в CV: выходное напряжение стабилизируется на заданном уровне, а зарядный ток уменьшается (рис. 6). Полученные результаты подтверждают корректность реализованного алгоритма CC/CV [3–6].

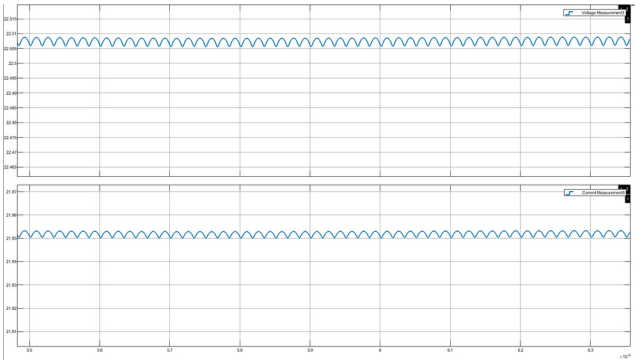


Рисунок 4 — Выходной ток и напряжение в установившемся режиме CC

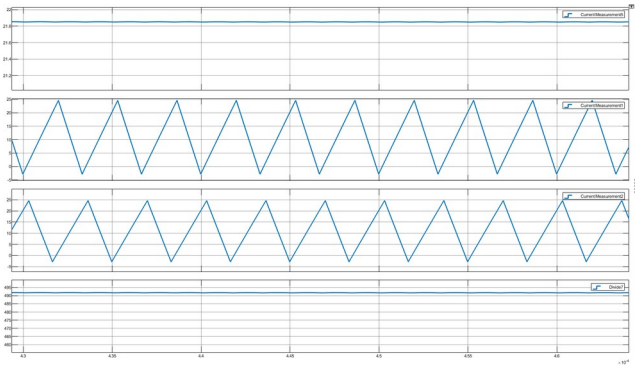


Рисунок 5 — Суммарный выходной ток, токи дросселей фаз 1, 2 и выходная мощность в режиме CC

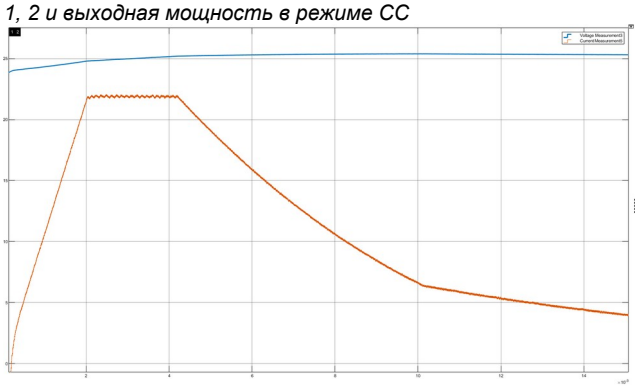


Рисунок 6 — Переход из режима CC в режим CV: выходное напряжение и ток)

4. Исследование режима мягкой коммутации ZVS

При частоте коммутации 500 кГц коммутационные потери становятся существенной составляющей потерь силового преобразователя, особенно вследствие процессов заряда и разряда выходных ёмкостей силовых ключей C_{oss} [10, 11]. Для их снижения исследована возможность реализации переключения при нулевом напряжении ZVS [9].

В течение dead-time ток дросселя обеспечивает перезаряд выходных ёмкостей ключей полумоста. Упрощённое условие формирования ZVS может быть записано как

$$IL(tdead)\cdot tdead \geq 2\cdot Coss\cdot Vin.$$

Следовательно, возможность мягкого переключения определяется током дросселя, длительностью dead-time, входным напряжением и выходной ёмкостью транзисторов [9–11].

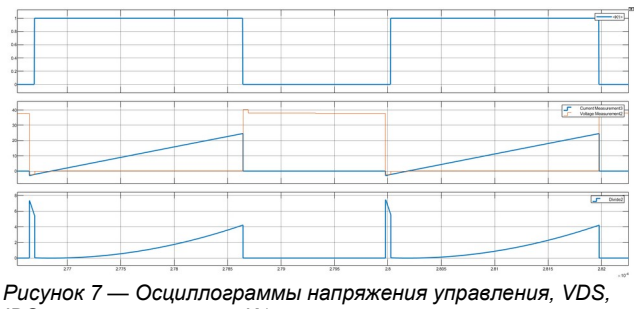


Рисунок 7 — Осциллограммы напряжения управления, VDS, IDS и мощности ключа K1.

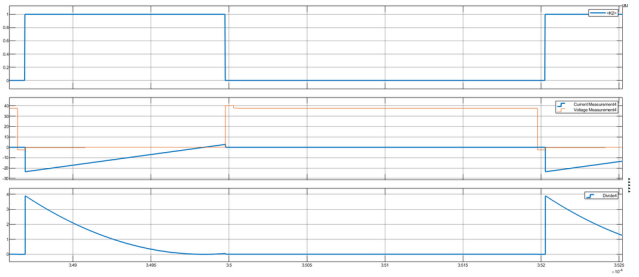


Рисунок 8 — Осциллограммы напряжения управления, VDS, IDS и мощности ключа K2.

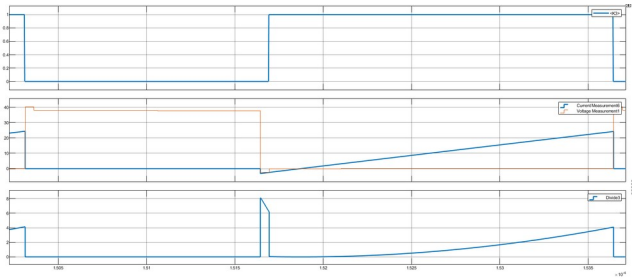


Рисунок 9 — Осциллограммы напряжения управления, VDS, IDS и мощности ключа K3

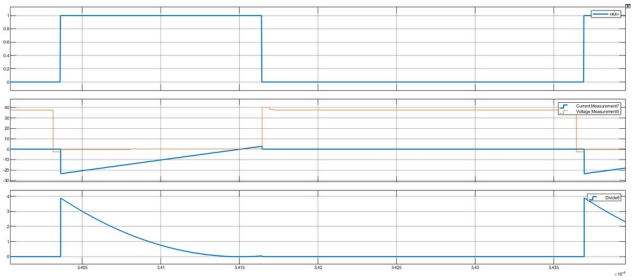


Рисунок 10 — Осциллограммы напряжения управления, VDS, IDS и мощности ключа K4

Для проверки режима анализировались напряжения V_{DS}, токи I_{DS}, управляющие сигналы и мгновенная мощность ключей K1–K4. Соответствующие осциллограммы приведены на рис. 7–10. В момент включения ключей напряжение V_{DS}снижается до значения, близкого к нулю, а область одновременного присутствия значительных напряжения и тока уменьшается. Полученные результаты подтверждают формирование условий ZVS в исследуемом режиме.

5. Синтез корректирующего звена внутреннего контура тока

Для синтеза регулятора выполнена идентификация малосигнальной передаточной функции объекта управления:

$$G(s) = \frac{\Delta I_{out}(s)}{\Delta d(s)}$$

методом Frequency Response Estimation MATLAB. Рабочая точка соответствовала $V_{in} = 50$В, $V_{out} = 21{,}6$В, $I_{out} = 22$А и $D \approx 0{,}435$. Полученные частотные характеристики и их аппроксимация приведены на рис. 11.

В качестве корректирующего звена выбран PI-регулятор:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

При синтезе принимались ограничения: частота среза не более $f_{sw}/10 = 50$ кГц, запас по фазе не менее 45° и запас по усилению не менее 6 дБ. В результате получены $K_p = 0{,}0105\text{А}^{-1}$, $K_i = 231(\text{А}\cdot\text{с})^{-1}$. Частота среза составила 31 кГц, запас по фазе — 63°, запас по усилению — 19 дБ. Диаграммы Боде скорректированного контура приведены на рис. 12.

Проверка при $V_{in} = 38 - 76$В и $V_{out} = 18 - 25{,}2$В показала сохранение устойчивости во всём исследуемом диапазоне. Частота среза составляла 25–43 кГц, запас по фазе — 57–67°, а время регулирования — 0,8–1,5 мс, что соответствует установленным требованиям. Использование обратной связи и оценка устойчивости при изменении рабочей точки соответствуют современным подходам к управлению зарядными преобразователями [1, 3].

Результаты оценки показателей качества контура стабилизации тока при различных рабочих точках приведены в табл. 2.

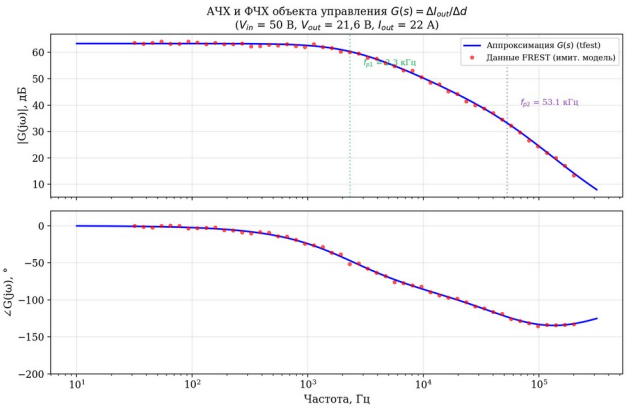


Рисунок 11 — АЧХ и ФЧХ объекта управления G(s): данные FREST и аппроксимация tfest.

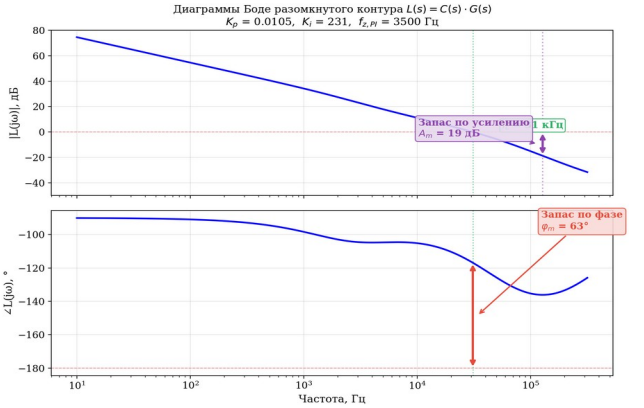


Рисунок 12 — Диаграммы Боде разомкнутого контура L(s) = C(s)·G(s))

Таблица 2

Показатели качества контура стабилизации тока при различных режимах работы

Vin, В	Vout, В	fc, кГц	Запас φ, °	Перерег., %	tрег, мс
38	18,0	25	67	4	1,4
38	25,2	25	67	4	1,5
50	21,6	31	63	5	1,2
76	18,0	43	57	7	0,8
76	25,2	43	57	7	0,9

6. Исследование работы при изменении входного напряжения солнечной батареи

В условиях эксплуатации малого космического аппарата входное напряжение зарядного устройства определяется солнечной батареей и может изменяться скачкообразно. Для проверки устойчивости системы управления в модели реализован ступенчатый профиль входного напряжения, включающий переходы между уровнями 38 В, 48 В и 76 В. Схема формирования сброса-наброса входного напряжения приведена на рисунке 13.

Для оценки динамических свойств системы моделировались ступенчатые изменения входного напряжения, имитирующие изменение режима солнечной батареи [12]. Исследованы режимы увеличения входного напряжения с 38 до 48 В и с 48 до 76 В, а также уменьшения входного напряжения с 76 до 38 В. Соответствующие осциллограммы приведены на рис. 14–16.

При ступенчатом увеличении входного напряжения с 38 до 45 В максимальное перерегулирование выходного тока составило 14,1 %, провал — 13,6 %, а время установления по критерию ±5 % — 80–90 мкс. При увеличении входного напряжения с 48 до 76 В соответствующие значения составили 11,4 %, 7,7 % и 65–75 мкс. Наиболее выраженный переходный процесс наблюдался при ступенчатом уменьшении входного напряжения с 76 до 38 В: выходной ток кратковременно возрастал до 29,2 А, после чего снижался до 15,5 А. Максимальное перерегулирование при этом составило 32,7 %, провал — 29,5 %, а время восстановления до области ±5 % от установившегося значения — 75–90 мкс.

Во всех исследованных режимах переходные процессы имеют затухающий характер и ток возвращается к заданному уровню 22 А. Следовательно, синтезированный регулятор сохраняет устойчивость во всём рассматриваемом диапазоне входного напряжения.

Заключение

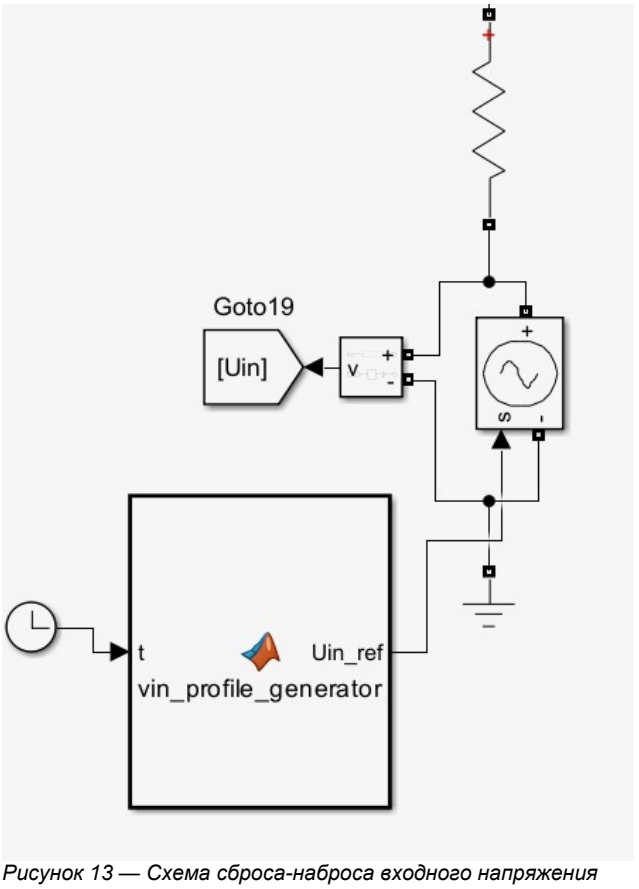


Рисунок 13 — Схема сброса-наброса входного напряжения

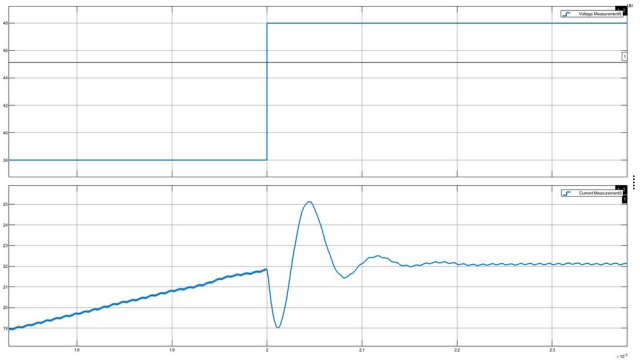


Рисунок 14 — Переходный процесс при повышении входного напряжения с 38 В до 48 В

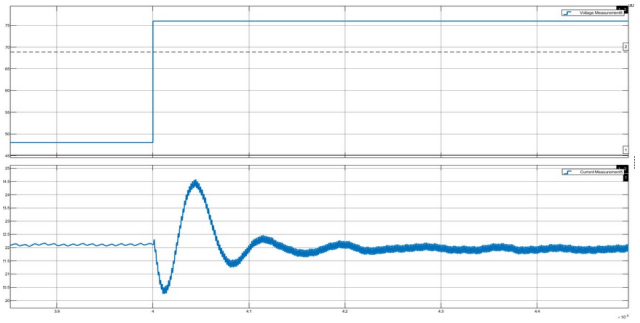


Рисунок 15 — Переходный процесс при повышении входного напряжения с 48 В до 76 В

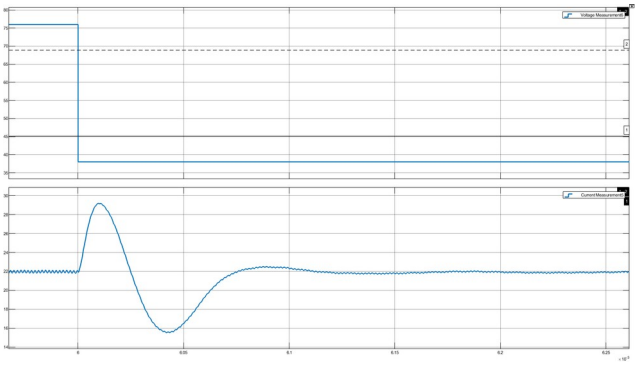


Рисунок 16 — Переходный процесс при понижении входного напряжения с 76 В до 38 В

Разработана имитационная модель зарядного устройства аккумуляторной батареи малого космического аппарата на основе двухфазного синхронного понижающего преобразователя. Подтверждена работа алгоритма CC/CV и снижение пульсаций суммарного выходного тока при сдвиге фаз 180°. Анализ коммутационных процессов показал возможность формирования условий ZVS при выбранном dead-time.

Для внутреннего контура стабилизации тока синтезирован PI-регулятор, обеспечивающий частоту среза 31 кГц, запас по фазе 63° и запас по усилению 19 дБ. При изменении входного напряжения в диапазоне 38–76 В система сохраняет устойчивость и возвращает зарядный ток к заданному значению после переходных процессов. Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанной модели при проектировании зарядных устройств аккумуляторных батарей систем электропитания МКА.

Литература

1. Mammeri E. N., Lopez-Santos O., El Aroudi A., Domajnko J., Prosen N., Martinez-Salamero L. Modeling and Control of a Three-Phase Interleaved Buck Converter as a Battery Charger // IEEE Access. — 2025. — Vol. 13. — P. 18325–18345. — DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3533032.
2. Kandeel Y., O'Driscoll S., O'Mathuna C., Duffy M. Optimum Phase Count in a 5.4-W Multiphase Buck Converter Based on Output Filter Component Energies // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2023. — Vol. 38, no. 4. — P. 4909–4920. — DOI: 10.1109/TPEL.2022.3226708.
3. López-Santos O., Torres-Pinzón C. A., Flores-Bahamonde F., Haroun R., Garriga J. A., Valderrama-Blavi H., Martínez-Salamero L. Robust Control for a Battery Charger Using a Quadratic Buck Converter // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — P. 125480–125492. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3454362.
4. Chen C., Wei Z., Knoll A. C. Charging Optimization for Li-Ion Battery in Electric Vehicles: A Review // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2022. — Vol. 8, no. 3. — P. 3068–3089. — DOI: 10.1109/TTE.2021.3135525.
5. Liu P.-J., Chen T.-F., Yang H.-S. A Li-Ion Battery Charger With Variable Charging Current and Automatic Voltage-Compensation Controls for Parallel Charging // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. — 2022. — Vol. 10, no. 1. — P. 997–1006. — DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3088890.
6. Bose B., Garg A., Gao L., Kim J., Singh S. Development of Novel MSCCCTCV Charging Strategy for Health-Aware Battery Fast Charging Using QOGA Optimization // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2024. — Vol. 10, no. 2. — P. 4432–4440. — DOI: 10.1109/TTE.2023.3314216.
7. Qian K., Fachrizal R., Munkhammar J., Ebel T., Adam R. The Impact of Considering State-of-Charge-Dependent Maximum Charging Powers on the Optimal Electric Vehicle Charging Scheduling // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2023. — Vol. 9, no. 3. — P. 4517–4530. — DOI: 10.1109/TTE.2023.3245332.
8. Jiang T., Zhang S., Xie J., Fan J., Yang C., Han X. A Coupled L-LC Filter for Interleaved Buck Converter Ripple Cancellation // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2024. — Vol. 39, no. 5. — P. 6028–6039. — DOI: 10.1109/TPEL.2024.3365171.
9. Bokmans B. F. J., Vermulst B. J. D., Schellekens J. M., Huisman H. A Delta-Sigma Modulated Power Converter With Inherent Zero-Voltage Switching // IEEE Open Journal of Power Electronics. — 2024. — Vol. 5. — P. 250–260. — DOI: 10.1109/OJPEL.2024.3359848.
10. Song Q., Zhang R., Li Q., Zhang Y. Output Capacitance Loss of GaN HEMTs in Steady-State Switching // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2024. — Vol. 39, no. 5. — P. 5547–5557. — DOI: 10.1109/TPEL.2023.3279308.
11. Udabe A., Baraia-Etxaburu I., Garrido Diez D. Gallium Nitride Power Devices: A State of the Art Review // IEEE Access. — 2023. — Vol. 11. — P. 48628–48650. — DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3277200.

12. Mostacciuolo E., Baccari S., Sagnelli S., Iannelli L., Vasca F. An Optimization Approach for Electrical Power System Supervision and Sizing in Low Earth Orbit Satellites // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — P. 151864–151875. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3473690.

Simulation model of a two-phase synchronous buck converter for a battery charger

Dandarov V.D.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

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

The paper presents a study of a simulation model of a battery charger for a small spacecraft based on a two-phase synchronous buck converter. The model was developed in MATLAB/Simulink and is intended for the analysis of electromagnetic processes in the power stage, verification of the 180° interleaved phase control algorithm, investigation of zero-voltage switching (ZVS), synthesis of a PI controller for the inner current loop, and evaluation of the converter dynamic behavior under variations in the solar array input voltage. Constant-current (CC) and constant-voltage (CV) charging modes are considered, as well as transient processes caused by step changes in the input voltage within the range of 38–76 V. It is shown that the two-phase topology reduces the ripple of the total output current, while the control system remains stable under variations in the power source parameters. The simulation results confirm the applicability of the developed model for the design of a charger for a lithium iron phosphate (LiFePO4) battery.

Keywords: battery charger, rechargeable battery, LiFePO4, small spacecraft, two-phase synchronous buck converter, MATLAB/Simulink, CC/CV, ZVS, PI controller, solar array.

References

1. Mammeri E. N., Lopez-Santos O., El Aroudi A., Domajnko J., Prosen N., Martinez-Salamero L. Modeling and Control of a Three-Phase Interleaved Buck Converter as a Battery Charger // IEEE Access. — 2025. — Vol. 13. — P. 18325–18345. — DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3533032.
2. Kandeel Y., O'Driscoll S., O'Mathuna C., Duffy M. Optimum Phase Count in a 5.4-W Multiphase Buck Converter Based on Output Filter Component Energies // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2023. — Vol. 38, no. 4. — P. 4909–4920. — DOI: 10.1109/TPEL.2022.3226708.
3. López-Santos O., Torres-Pinzón C. A., Flores-Bahamonde F., Haroun R., Garriga J. A., Valderrama-Blavi H., Martínez-Salamero L. Robust Control for a Battery Charger Using a Quadratic Buck Converter // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — P. 125480–125492. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3454362.
4. Chen C., Wei Z., Knoll A. C. Charging Optimization for Li-Ion Battery in Electric Vehicles: A Review // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2022. — Vol. 8, no. 3. — P. 3068–3089. — DOI: 10.1109/TTE.2021.3135525.
5. Liu P.-J., Chen T.-F., Yang H.-S. A Li-Ion Battery Charger With Variable Charging Current and Automatic Voltage-Compensation Controls for Parallel Charging // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. — 2022. — Vol. 10, no. 1. — P. 997–1006. — DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3088890.
6. Bose B., Garg A., Gao L., Kim J., Singh S. Development of Novel MSCCCTCV Charging Strategy for Health-Aware Battery Fast Charging Using QOGA Optimization // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2024. — Vol. 10, no. 2. — P. 4432–4440. — DOI: 10.1109/TTE.2023.3314216.
7. Qian K., Fachrizal R., Munkhammar J., Ebel T., Adam R. The Impact of Considering State-of-Charge-Dependent Maximum Charging Powers on the Optimal Electric Vehicle Charging Scheduling // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2023. — Vol. 9, no. 3. — P. 4517–4530. — DOI: 10.1109/TTE.2023.3245332.
8. Jiang T., Zhang S., Xie J., Fan J., Yang C., Han X. A Coupled L-LC Filter for Interleaved Buck Converter Ripple Cancellation // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2024. — Vol. 39, no. 5. — P. 6028–6039. — DOI: 10.1109/TPEL.2024.3365171.
9. Bokmans B. F. J., Vermulst B. J. D., Schellekens J. M., Huisman H. A Delta-Sigma Modulated Power Converter With Inherent Zero-Voltage Switching // IEEE Open Journal of Power Electronics. — 2024. — Vol. 5. — P. 250–260. — DOI: 10.1109/OJPEL.2024.3359848.
10. Song Q., Zhang R., Li Q., Zhang Y. Output Capacitance Loss of GaN HEMTs in Steady-State Switching // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2024. — Vol. 39, no. 5. — P. 5547–5557. — DOI: 10.1109/TPEL.2023.3279308.
11. Udabe A., Baraia-Etxaburu I., Garrido Diez D. Gallium Nitride Power Devices: A State of the Art Review // IEEE Access. — 2023. — Vol. 11. — P. 48628–48650. — DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3277200.
12. Mostacciuolo E., Baccari S., Sagnelli S., Iannelli L., Vasca F. An Optimization Approach for Electrical Power System Supervision and Sizing in Low Earth Orbit Satellites // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — P. 151864–151875. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3473690.