
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.314.1:629.584

EDN MFEQAW

**МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
ГЛУБОКОВОДНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ****В.В. Ваняев**ORCID: 0000-0001-9597-3865 e-mail: vanyaev.w@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.В. Соколов**ORCID: 0000-0002-1743-0256 e-mail: victorsokolov52@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Б. Дарьенков**ORCID: 0000-0001-9941-4550 e-mail: darenkov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Кукушкин**e-mail: info.vid@yandex.ruООО «КОМПАНИЯ «ВИД»
*Нижний Новгород, Россия***И.Е. Бердников**ORCID: 0000-0003-1652-5453 e-mail: berdnirdnikov@gmail.comАО «Автомобильный завод «УРАЛ»
*Нижний Новгород, Россия***А.П. Слузов**ORCID: 0000-0002-4864-3983 e-mail: anton.sluzov@yandex.ruАО «Автомобильный завод «УРАЛ»
*Нижний Новгород, Россия***А.Е. Храмов**ORCID: 0000-0002-1743-0256 e-mail: anton.khramov.nnstu2023@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен вариант модульной структуры силовых цепей системы электропитания глубоководных беспилотных аппаратов, построенной на базе транзисторного преобразователя с последовательным полумостовым резонансным инвертором. Приведены результаты имитационного моделирования нестационарных процессов в модуле. Предложено схемное решение силовой части модуля с мягкой коммутацией транзисторов.

Ключевые слова: система электропитания, беспилотный аппарат, модуль, резонансный инвертор, нестационарные процессы.

Для цитирования: Ваняев В.В., Соколов В.В., Дарьенков А.Б., Кукушкин А.В., Бердников И.Е., Слuzов А.П., Храмов А.Е. Модульная система электропитания глубоководных беспилотных аппаратов // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 4-15. EDN MFEQAW

MODULAR POWER SUPPLY SYSTEM FOR DEEP-SEA UNMANNED VEHICLES

V.V. Vanyaev

ORCID: **0000-0001-9597-3865** e-mail: **vanyaev.w@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.V. Sokolov

ORCID: **0000-0002-1743-0256** e-mail: **victorsokolov52@yandex.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.B. Dar`enkov

ORCID: **0000-0001-9941-4550** e-mail: **darenkov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Kukushkin

e-mail: **info.vid@yandex.ru**
LLC «VID» Company
Nizhny Novgorod, Russia

I.E. Berdnikov

ORCID: **0000-0003-1652-5453** e-mail: **berdnirdnkov@gmail.com**
JSC Automobile Plant URAL
Nizhny Novgorod, Russia

A.P. Sluzov

ORCID: **0000-0002-4864-3983** e-mail: **anton.sluzov@yandex.ru**
JSC Automobile Plant URAL
Nizhny Novgorod, Russia

A.E. Khramov

ORCID: 0000-0002-1743-0256 e-mail: anton.khramov.nnstu2023@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Proposed a variant of the modular structure of the power circuits of the power supply system of deep-sea unmanned vehicles, built on the basis of a transistor converter with a series half-bridge resonant inverter. The results of simulation modeling of non-stationary processes in the module are presented. A circuit solution for the power section of the module with soft switching of transistors is proposed.

Keywords: power supply system, unmanned vehicle, module, resonant inverter, non-stationary processes.

For citation: V.V. Vanyaev, V.V. Sokolov, A.B. Dar`enkov, A.V. Kukushkin, I.E. Berdnikov, A.P. Sluzov and A.E. Khramov, "Modular power supply system for deep-sea unmanned vehicles", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 4-15, 2025. EDN MFEQAW

I. Введение

Электропитание подводных потребителей электрической энергии, к которым, в частности, относятся глубоководные беспилотные аппараты, предназначенные для глубоководных исследований [1], геологоразведки [2] и добычи полезных ископаемых [3], осуществляется как на постоянном, так и переменном напряжении [4]. Системы электропитания (СЭ) с передачей энергии постоянного тока имеют ряд достоинств, обусловленных отсутствием реактивной составляющей напряжения и тока в питающем кабелетросе, соединяющем надводную и подводную часть СЭ, принципиальной возможностью снижения ее массы и габаритов при соответствующем выборе рабочей частоты преобразовательной части СЭ.

II. Структура системы электропитания глубоководного аппарата

Одной из основных трудностей создания таких систем является преобразование высокого напряжения в подводной части (ПЧ) системы при напряжении питающего кабеля, достигающего значения 2400 В и более [1, 4].

Эта задача решается путем последовательного соединения по входным и параллельно по выходным цепям нескольких ($N = 3 \dots 4$) модулей, построенных на базе транзисторных однофазных автономных инверторов (АИ) [2]. Такой подход позволяет использовать низковольтную полупроводниковую элементную базу и возможность наращивания выходной мощности СЭ путем увеличения числа ее модулей [3].

На рис. 1 приведена структура силовых цепей такой СЭ, в состав которой входят:

- а) надводная часть (НЧ), содержащая:
 - первичный источник электропитания (на схеме не показан);

- входной выпрямитель (В) со сглаживающим L - C фильтром (Ф);
 - несколько (M) идентичных DC/DC модулей, выходы которых последовательно соединены между собой и подключены к входу подводного кабеля-троса (КТ);
 - вольтодобавочный модуль (ВДМ);
 - система управления и контроля состояния узлов НЧ (СУНЧ);
 - датчик тока (ДТ) кабеля-троса и датчик напряжения (ДН) на выходе НЧ;
- НЧ;
- б) кабель-трос (КТ);
 - в) подводная часть (ПЧ), содержащая:
 - несколько (N) идентичных DC/DC модулей, входы которых шунтированы конденсаторами фильтра $C1.1 \dots C1.N$ одинаковой емкости, последовательно соединены и подключены к подводному выходу КТ, а параллельно соединенные выходы подключены к нагрузке;
 - система управления модулями ПЧ (СУПЧ).

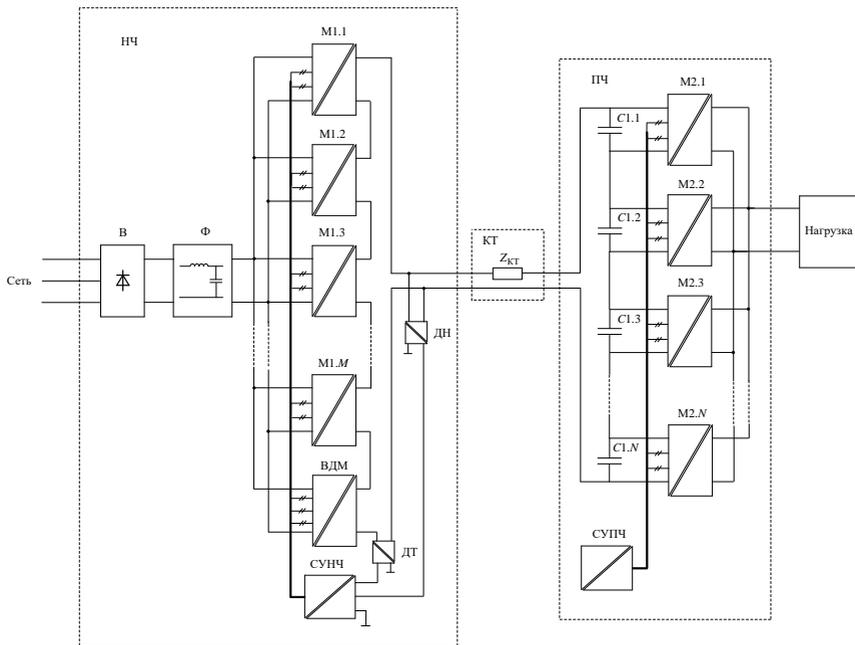


Рис. 1. Структура силовых цепей модульной СЭ

Fig. 1. Structure of power circuits of modular power supply system

Входной выпрямитель обеспечивает питание группы надводной части DC/DC модулей [5] и при рациональном выборе параметров сглаживающего L - C фильтра [6] позволяет получить в режиме номинальной нагрузки значение коэффициента k_m мощности СЭ в пределах $k_m = 0,94 \div 0,95$.

III. DC/DC модуль на основе резонансного инвертора

DC/DC модули выполнены на базе последовательных резонансных инверторов (ПИ) с разделительными трансформаторами, обеспечивающими гальваническую развязку и согласование напряжений электрооборудования бортовой сети судна и силовых цепей СЭ.

Несомненными и важными достоинствами такой структуры являются:

- простая и надежная схема силового контура, что подтверждается многолетней безаварийной эксплуатацией таких устройств в системах зарядки емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) [6];
- достаточно жесткая внешняя характеристика в области рабочих нагрузок [7];
- малые коммутационные потери и пониженный уровень помех;
- использование индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора в качестве элемента силового резонансного контура;
- принципиальная способность функционирования в режиме перегрузки СЭ.

Наиболее простым схемотехническим вариантом одного модуля подобной структуры, по мнению авторов, является DC/DC преобразователь на основе последовательного полумостового резонансного инвертора с одним конденсатором резонансного L - C контура [7], силовая часть которого содержит минимальное число компонентов (рис. 2).

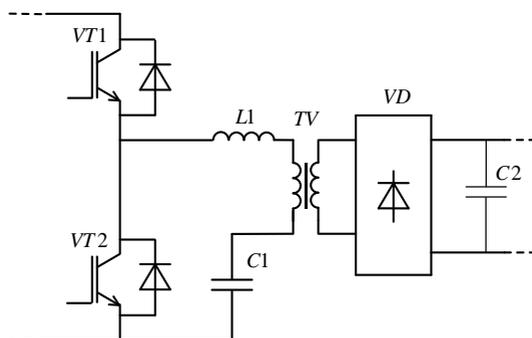


Рис. 2. Схема силовой части модуля ПЧ СЭ

Fig. 2. Power section diagram of the module

В качестве важных достоинств силовой части модуля (рис. 2) следует отметить стабильность протекания электромагнитных процессов в нем без экстремальных значений напряжений и токов, угрожающих работоспособности полупроводниковых компонентов, в нестационарных режимах, таких как включение/выключение, работа (в том числе длительная) на нагрузку с малым сопротивлением, обрыв цепи нагрузки при выборе тактовой частоты f инвертора из условия $f \leq 1/4\pi\sqrt{L_1 C_1}$, где L_1, C_1 – параметры резонансного контура).

IV. Исследование DC/DC модуля на основе резонансного инвертора

На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены диаграммы работы модуля при периодических переключениях его из режима холостого хода в режим номинальной $R_{ном}$ нагрузки (рис. 3) и из режима холостого хода на нагрузку с сопротивлением $0,001 \cdot R_{ном}$ (рис. 4), соответствующей практическому режиму короткого замыкания (КЗ) на выходных зажимах модуля, при котором его выходное напряжение практически равно нулю. Режиму холостого хода на рис. 4 предшествует интервал нарастания выходного напряжения модуля, где происходит зарядка конденсатора C_2 выходного фильтра.

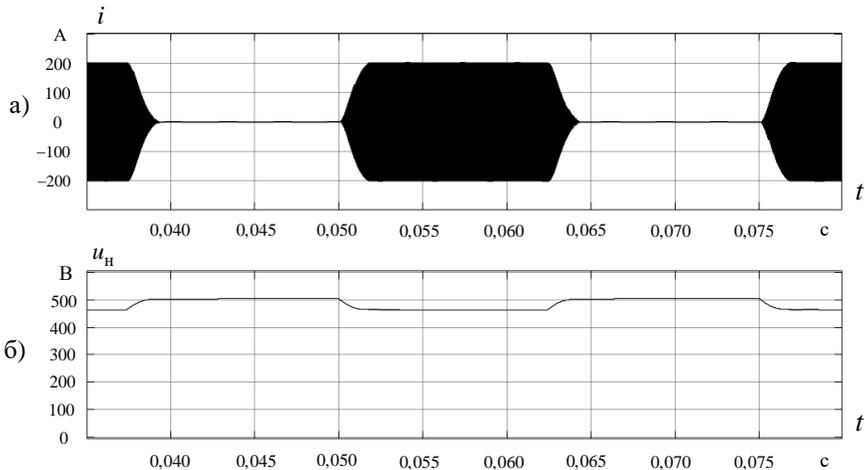


Рис. 3. Диаграммы тока дросселя резонансного контура (а) и выходного напряжения (б) модуля на холостом ходу и номинальной $R_{ном}$ нагрузке

Fig. 3. Diagrams of the choke current of the resonant circuit (a) and the output voltage (b) of the module at no-load and nominal $R_{ном}$ load

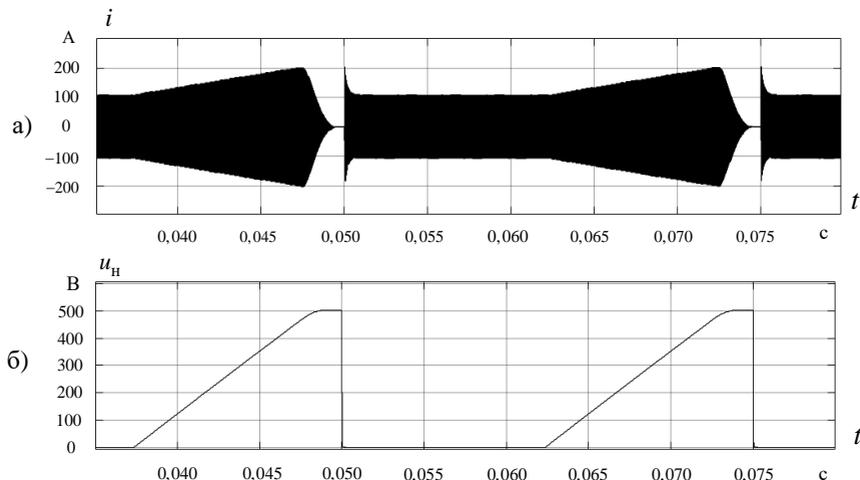


Рис. 4. Диаграммы тока дросселя резонансного контура (а) и выходного напряжения (б) модуля на холостом ходу и КЗ нагрузки

Fig. 4. Diagrams of the choke current of the resonant circuit (a) and the output voltage (b) of the module at no-load and short-circuit load

Диаграммы получены на имитационной модели в среде *MATLAB Simulink* при следующих параметрах модели:

- напряжение питания модуля $U_n = 500$ В;
- номинальное выходное напряжение модуля $U_{\text{вых}} = 500$ В;
- индуктивность резонансного контура $L_1 = 9$ мкГн;
- емкость конденсатора резонансного контура $C_1 = 1,6$ мкФ;
- емкость конденсатора выходного фильтра $C_2 = 670$ мкФ;
- добротность резонансного контура $Q = 24$;
- тактовая частота $f = 20$ кГц;
- коэффициент k_{21} трансформации $k_{21} = 2$.

Из приведенных диаграмм следует, что в динамических режимах работы при скачкообразном набросе/сбросе нагрузки модуля, выполненного по рассматриваемой схеме, величины токов и напряжений в его силовой схеме не выходят за пределы рабочих значений, что значительно упрощает алгоритм управления им и повышает надежность его работы.

V. DC/DC модуль на основе резонансного инвертора с мягкой коммутацией

Весьма перспективным представляется применение при создании такой СЭ *SiC MOSFET* с *SiC* диодами Шоттки с реализацией мягкой (*ZVS*) коммутации транзисторов модулей. Это позволяет без изменения алгоритма

управления модулями и незначительной коррекции импульсов управления транзисторами значительно повысить тактовую частоту и уменьшить массу и габариты моточных компонентов АИ.

На рис. 5 приведена схема силовой части модуля ПЧ СЭ, в котором, аналогично изложенному в [8], реализуется *ZVS* коммутация *MOSFET*. Схема отличается от базовой (рис. 2) наличием дополнительного дросселя *L2* относительно небольшой мощности, емкостного делителя *C3*, *C4*, а также снабберных конденсаторов *C5*, *C6*, включаемых параллельно транзисторам. В качестве емкостного делителя могут быть использованы два последовательно включенных конденсатора входного фильтра модуля.

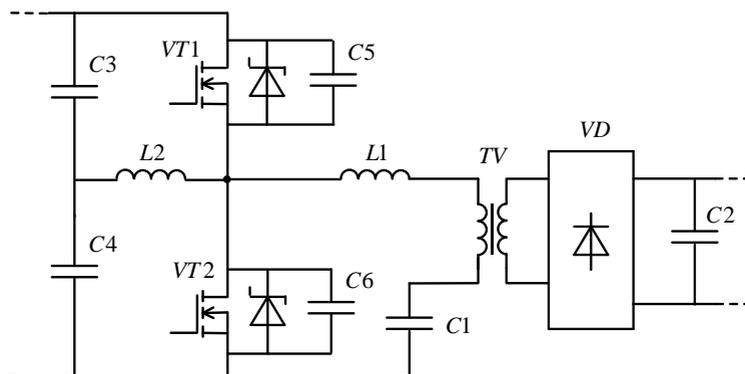


Рис. 5. Схема силовой части модуля ПЧ СЭ с *ZVS* - коммутацией

Fig. 5. Power section diagram of the module with *ZVS*

VI. Вольтодобавочный модуль

В структуре НЧ (рис. 1) имеется вольтодобавочный модуль (ВДМ) с регулируемым выходным напряжением, который предназначен для поддержания неизменным выходного напряжения СЭ.

Этот модуль может быть выполнен, например, на основе АИ с широтно-импульсной модуляцией, или иметь какое-либо другое схемное решение. С целью унификации узлов СЭ ВДМ в структуре на рис. 1 реализован на основе нерегулируемого РИ, вход которого подключен к выходу прямоходового широтно-импульсного преобразователя (ШИП) (рис. 6). Управление ШИП осуществляется в соответствии с сигналами обратной связи по выходному току и напряжению НЧ СЭ, поступающих с датчиков ДТ и ДН (рис. 1).

Корректно настроенная положительная обратная связь по току позволяет скомпенсировать суммарное падение напряжения на активном сопротивлении КТ и в силовых элементах ПЧ СЭ под нагрузкой, а отрицательная обратная связь по выходному напряжению НЧ – устранить влияние на него отклонений напряжения питающей сети от номинального значения.

В качестве датчиков могут быть использованы микросхемы типа *ACNT-H87A-500E* [9], которые позволяют реализовать высокопотенциальную гальваническую развязку силовых цепей и цепей управления СЭ.

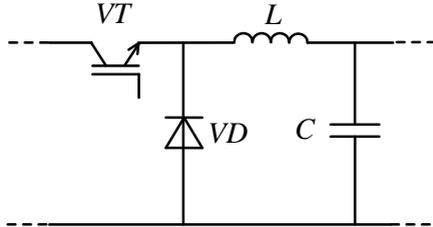


Рис. 6. Схема силовой части ШИП вольтодобавочного модуля

Fig. 6. Diagram of the power part of the DC converter for the voltage supplement module

Система управления группой модулей ПЧ содержит автономный N каналный генератор импульсов управления транзисторами N модулей. Тактовая частота f_n каждого из каналов пропорциональна задающему напряжению $U_n^{\text{зад}}$. При равенстве задающих напряжений $U_1^{\text{зад}} = U_2^{\text{зад}} = U_n^{\text{зад}} = U_N^{\text{зад}}$ всех каналов фазовый сдвиг φ_n управляющих импульсов n -го модуля фиксирован и равен $\varphi_n = 2\pi(n-1)/N$. Фазовый сдвиг управляющих импульсов транзисторами в каждом модуле равен π . Такое управление обеспечивает низкий уровень переменной составляющей тока, потребляемого группой модулей ПЧ.

Системы управления модулями НЧ и ПЧ реализованы на контроллере *STM32F405RGT6* [10]. Питание узлов системы управления ПЧ СЭ осуществляется напряжением, снимаемым с одного из последовательно соединенных конденсаторов входного фильтра ПЧ.

VII. Заключение

Предложенная модульная структура силовых цепей позволяет унифицировать схемные решения *DC/DC* модулей надводной и подводной части СЭ.

Применение *DC/DC* преобразователя на основе последовательного полумостового резонансного инвертора позволяет обеспечить стабильный характер протекания электромагнитных процессов в нем в нестационарных

режимах при значениях токов и напряжений, не превышающих их рабочих значений в квазиустановившихся режимах.

Силовая часть модулей СЭ может быть выполнена на базе *SiC MOSFET* с *SiC* диодами Шоттки и мягкой коммутацией, что позволяет при неизменном алгоритме управления увеличить тактовую частоту и минимизировать моточные компоненты АИ.

© Ваняев В.В., 2025

© Соколов В.В., 2025

© Дарьенков А.Б., 2025

© Кукушкин А.В., 2025

© Бердников И.Е., 2025

© Слuzов А.П., 2025

© Храмов А.Е., 2025

Поступила в редакцию 27.01.2025

Принята к публикации 03.02.2025

Received 27.01.2025

Accepted 03.02.2025

Библиографический список

- [1] Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского Политехнического Университета. 2004. Т. 307. № 5. С. 120-123.
- [2] Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Массогабаритные характеристики системы электропитания в функции от рабочей глубины телеуправляемого подводного аппарата // Известия Томского Политехнического Университета. 2006. Т. 309. № 1. С. 163-167.
- [3] Шматков А.А., Крутиков П.В., Шматков А.Г., Олешко Р.В. Разработка модульной системы электропитания и движительного комплекса типа тяжелого рабочего класса на постоянном токе // Подводные Исследования и Робототехника. 2021. № 4 (38). С. 15-25. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_02
- [4] Fard R.N., Tedeschi E. Power system design considerations for a seafloor mining vehicle // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sep. 23-27, 2018, Portland, OR, USA: IEEE, 2018. P. 1164-1171. DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558004
- [5] Герасимов В.А., Комлев А.В., Найденко Н.А., Филоженко А.Ю. Исследование и разработка системы энергообеспечения привязного подводного робота с модернизированным источником электропитания // Подводные Исследования и Робототехника. 2021. № 3 (37). С. 82-89. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
- [6] Ваняев В.В., Копелович Е.А., Троицкий М.М. Расчет транзисторно-конденсаторных источников ускоряющего напряжения гиротронов // Практическая Силовая Электроника. 2018. № 1 (69). С. 11-18.
- [7] Ваняев В.В., Соколов В.В., Дарьенков А.Б., Копелович Е.А., Бердников И.Е., Слuzов А.П., Смирнова А.В. Особенности работы источника электропитания на

- базе последовательного резонансного инвертора // Электротехника. 2024. № 10. С. 28-34. DOI: 10.53891/00135860-2024-10-28-34
- [8] Ваняев В.В., Копелович Е.А. Зарядное устройство емкостного накопителя энергии, Пат. 2810546 RU, заявл. 11.10.23; опубл. 27.12.23. – Бюл. № 36.
- [9] ACNT-H87B, ACNT-H87A, ACNT-H870. Precision optically isolated voltage sensor in a 15-mm stretched SO-8 package. [Электронный ресурс]. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/163/DOC011163218.pdf> (дата обращения 04.02.2025).
- [10] STM32F405xx STM32F407xx. Datasheet - production data. [Электронный ресурс]. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/529/DOC010529700.pdf> (дата обращения 04.02.2025).

References

- [1] V.M. Rulevskiy, Yu.N. Dementyev and O.V. Bubnov, “Sistemy elektropitaniya te-leupravlyаемых podvodnyh apparatov [Power supply systems for remotely operated underwater vehicles]”, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 307, no. 5, pp. 120-123, 2004 (in Russian).
- [2] V.M. Rulevskiy, Yu.N. Dementyev and O.V. Bubnov, “Mass characteristics of power supply system in the function from operating depth of remotely controlled submersible craft”, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 309, no. 1, pp. 163-167, 2006.
- [3] A.A. Shmatkov, P.V. Krutikov, A.G. Shmatkov and R.V. Oleshko, “Development of a modular power supply system and propulsion system for a heavy work class rov”, *Underwater Investigations and Robotics*, vol. 4, no. 38, pp. 15-25, 2021. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_02
- [4] R.N. Fard and E. Tedeschi, “Power system design considerations for a seafloor mining vehicle”, in proc. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 23-27, 2018, Portland, OR, USA, pp. 1164-1171. DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558004
- [5] V.A. Gerasimov, A.V. Komlev, N.A. Naidenko and A.Yu. Filozhenko, “Research and development of an energy supply system for a tethered underwater robot with an upgraded power source”, *Underwater Investigations and Robotics*, vol. 3, no. 37, pp. 82-89, 2021. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_08
- [6] V.V. Vanyaev, E.A. Kopelovich and M.M. Troitsky, “Design of transistor-capacitor sources of gyrotrons’ accelerating voltage”, *Practical Power Electronics*, vol. 1, no. 69, pp. 11-18, 2018.
- [7] V.V. Vanyaev, V.V. Sokolov, A.B. Dar'enkov, E.A. Kopelovich, I.E. Berdnikov, A.P. Sluzov and A.V. Smirnova, “Features of operation of a secondary power supply source based on a serial resonant inverter”, *Elektrotehnika*, no. 10, pp. 28-34, 2024. DOI: 10.53891/00135860-2024-10-28-34
- [8] V.V. Vanyaev and E.A. Kopelovich, “Capacitive energy storage charger”, Patent RU 2810546, Dec. 27, 2023.
- [9] ACNT-H87B, ACNT-H87A, ACNT-H870. Precision optically isolated voltage sensor in a 15-mm stretched SO-8 package. [Online]. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/163/DOC011163218.pdf> [Accessed: Feb. 4, 2025].
- [10] STM32F405xx STM32F407xx. Datasheet - production data. [Online]. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/529/DOC010529700.pdf> [Accessed: Feb. 4, 2025].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ваняев Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Valery V. Vanyaev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Соколов Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Victor V. Sokolov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Дарьенков Андрей Борисович, доктор технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Andrey B. Darienkov, Doct. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Кукушкин Андрей Валерьевич, генеральный директор ООО «КОМПАНИЯ «ВИД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Andrey V. Kukushkin, general manager of the LLC “VID” Company, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Бердников Иван Евгеньевич, инженер АО «Автомобильный завод «УРАЛ», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Ivan E. Berdnikov, engineer of the JSC Automobile Plant URAL, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Слузов Антон Павлович, инженер АО «Автомобильный завод «УРАЛ», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton P. Sluzov, engineer of the JSC Automobile Plant URAL, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Храмов Антон Евгеньевич, младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anton E. Khramov, junior researcher of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.