

УДК 621.311.68

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.41.2.019](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.019)

## Информационная структура системы энергоснабжения и аппаратуры регулирования и контроля космического аппарата

И.В. Логинов<sup>1,2</sup>[✉](#), В.Л. Бурковский<sup>1</sup>, Г.А. Нетесов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российская Федерация

<sup>3</sup>АО «Орбита», Воронеж, Российская Федерация  
[ivvlalog@yandex.ru](mailto:ivvlalog@yandex.ru)[✉](#)

**Резюме.** Повышение качества работы автоматических систем управления является важной задачей во многих областях. Особенно остро данный вопрос стоит в системах, требующих повышенного уровня надежности, таких как системы управления космической техникой, в частности, системами энергоснабжения. Система энергоснабжения должна в полной мере обеспечивать потребность космического аппарата в электрической энергии, необходимой для выполнения штатной программы полета, из чего следуют повышенные требования к надежности и качеству ее работы. В статье рассмотрена функциональная и информационная структура систем электроснабжения космических аппаратов, описаны принципы информационного взаимодействия элементов аппаратуры регулирования и контроля с системой энергоснабжения, составлена иерархическая структура элементов системы управления энергоснабжением. Рассмотрены актуальные на текущий момент подходы к автоматическим системам контроля и управления системами энергоснабжения космических аппаратов. На основании этих данных, проанализированы алгоритмы управления системой энергоснабжения на примере алгоритмов заряда и разряда аккумуляторных батарей. Рассмотрены явления, не принятые во внимание при построении алгоритмов. Предложены пути усовершенствования алгоритмов управления зарядом и разрядом аккумуляторных батарей путем введения новых параметров для отслеживания степени деградации аккумуляторов, рассмотрены способы интеллектуализации алгоритма. Сделано предложение по интеллектуализации системы управления с помощью нейронной сети, обученной на бортовой телеметрии космического аппарата.

**Ключевые слова:** алгоритмы управления, системы электроснабжения космических аппаратов, аппаратура регулирования и контроля, бортовая компьютерная сеть, интеллектуализация системы управления.

**Для цитирования:** Логинов И.В., Бурковский В.Л., Нетесов Г.А. Информационная структура системы энергоснабжения и аппаратуры регулирования и контроля космического аппарата. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1365> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.019

## Information structure of power supply system and spacecraft regulation and control equipment

I.V. Loginov<sup>1,2</sup>[✉](#), V.L. Burkovsky<sup>1</sup>, G.A. Netesov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

<sup>2</sup>Concern Sozvezdiye JSC, Voronezh, the Russian Federation

<sup>3</sup>Orbita JSC, Voronezh, the Russian Federation  
[ivvlalog@yandex.ru](mailto:ivvlalog@yandex.ru)[✉](#)

**Abstract.** Improving the quality of automatic control systems is an important problem in many areas. This issue is particularly relevant in systems requiring an increased level of reliability, such as control systems for space equipment including power supply systems. Power supply systems must fully meet the need of a spacecraft in electric power required for regular flight program performance, which implies the increased requirements for its reliability and quality of its operation. The article considers functional and informational structure of spacecraft power supply systems. The principles of data exchange between the elements of regulation and control equipment with the power supply system are described and the hierarchical structure of the power supply control system elements is built. The current approaches to the automatic systems of control and management of spacecraft power supply systems are regarded. Based on these data, the algorithms of power supply system control are analyzed using the example of battery charging and discharging algorithms. The phenomena which are not accounted for when building the algorithms are considered. The means to improve the algorithms for controlling battery charging and discharging by introducing new parameters to track the degree of battery degradation are proposed, and the means of intellectualizing the algorithm are considered. A proposal is made to intellectualize the control system using a neural network trained on the spacecraft onboard telemetry.

**Keywords:** control algorithms, spacecraft power supply systems, regulation and control equipment, onboard computer network, control system intellectualization.

**For citation:** Loginov I.V., Burkovsky V.L., Netesov G.A. Information structure of power supply system and spacecraft regulation and control equipment. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1365> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.019

## Введение

Одной из важнейших бортовых систем любого космического аппарата, которая в первую очередь определяет его тактико-технические характеристики, надежность, срок службы и экономическую эффективность, является система электроснабжения [1].

Автономная система электроснабжения (СЭС) является одной из важнейших систем космического аппарата (КА). СЭС отвечает за бесперебойную генерацию и распределение электрической энергии бортовым системам КА.

В работе рассматривается алгоритм управления отдельными системами управления электроснабжения СЭС, с целью поиска возможных путей повышения надежности системы электроснабжения.

## Структура СЭС и иерархия средств управления

В общем случае, в систему электроснабжения входят: первичный и вторичный источник электроэнергии, преобразующие, зарядные устройства и автоматика управления [2].

Преимущественное распространение в качестве первичных источников энергии получили солнечные батареи (СБ), а в качестве накопителей электрической энергии, необходимой для штатного функционирования космического аппарата на теневых участках орбиты и в моменты пиковой нагрузки, широкое распространение получили аккумуляторные батареи (АБ) [3].

Автоматика управления иначе называется аппаратурой регулирования и контроля (АРК). Назначение АРК в системе электропитания – обеспечить электропотребление бортовой аппаратуры стабилизированным напряжением постоянного тока при работе от фотоэлектрических батарей на свету с параллельным зарядом аккумуляторной батареи избыточным током и в режиме разряда аккумуляторной батареи в нагрузку при нахождении КА в тени [4, 5].

Описанная схема построения СЭС, реализованная в совокупности с алгоритмами управления АРК, является оптимальной с точки зрения надежности и энергоэффективности [6].

Структура информационных связей СЭС КА на примере СЭС научно-энергетического модуля (НЭМ) представлена на Рисунке 1.

Исходя из данной схемы, можно разделить СЭС на две части

1. Непосредственно генераторы и поставщики электроэнергии: батареи фотоэлектрические (БФ), блоки электроники (БЭ) с никель-водородными аккумуляторными батареями (НВАБ).

2. Аппаратура регулирования и контроля (АРК), в которую входят вычислительные машины и исполнительные механизмы распределения электроэнергии и управления работой СЭС, такие как высоковольтные (БСШ-В) и низковольтные (БСШ-Н) силовые шины, регуляторы тока (РТ), силовые коммутаторы КС1 и КС2, преобразователь напряжения ПН, зарядное устройство (ЗУ), используемое для питания блока центральной вычислительной машины (БЦВМ), блок центрального управления (БЦУ) и зарядно-разрядные устройства (ЗРУ) НВАБ.

Блоки электроники в составе АБ обеспечивают прием и преобразование в цифровой код аналоговых параметров (напряжения, давления и температуры) НВАБ, формирование команд управления встроенным в НВАБ разрядным сопротивлением и передачу телеметрической информации о состоянии НВАБ в зарядно-разрядное устройство (ЗРУ) АРК по цифровому интерфейсу связи.

В состав приборов АРК, принимающих участие в работе АБ входят следующие приборы.

1. ЗРУ. Данный блок управляет режимами работы аккумуляторных батарей согласно заложенным алгоритмам и обеспечивает обмен данными с блоками электроники.

2. БЦУ. Данный блок осуществляет обмен данными с бортовой вычислительной системой (БВС) и ЗРУ.

3. БВС обеспечивает управление приборами АРК.

Иерархия средств управления аккумуляторной батареей имеет четыре уровня:

Первый уровень – блок электроники (БЭ).

Обеспечивает измерение и преобразование в цифровой код информации о напряжении, давлении и температуре аккумуляторов и передачу этой информации АРК, прием и выполнение команд на включение и отключение разрядных сопротивлений, поступающих из ЗРУ.

Второй уровень – ЗРУ.

Второй уровень управления представляет собой аппаратные и вычислительные средства зарядно-разрядного устройства (ЗРУ), обеспечивающие программную реализацию алгоритмов управления зарядом / разрядом в различных режимах работы АБ по данным, поступающим от БЭ и от БЦУ

Третий уровень – БЦУ АРК.

На данном уровне обеспечивается программно-аппаратное взаимодействие с ЗРУ по цифровому интерфейсу в части передачи команд, уставок, параметров АБ и ЗРУ, а также телеметрической информации контроля состояния интерфейсных линий, а также обмен данными с БВС, в том числе передача в БВС данных о состоянии каждой АБ и прием команд от БВС.

Четвертый уровень – БВС.

Данный уровень обеспечивает сбор и обработку телеметрической информации о параметрах состояния АБ и АРК, выдачу и отмену команд на запуск тестовосстановительного цикла (ТВЦ) и подзаряда аккумуляторных батарей, а также на

управление ЗРУ (включение / отключение ЗРУ и др.), в том числе и в случае нештатных ситуаций.

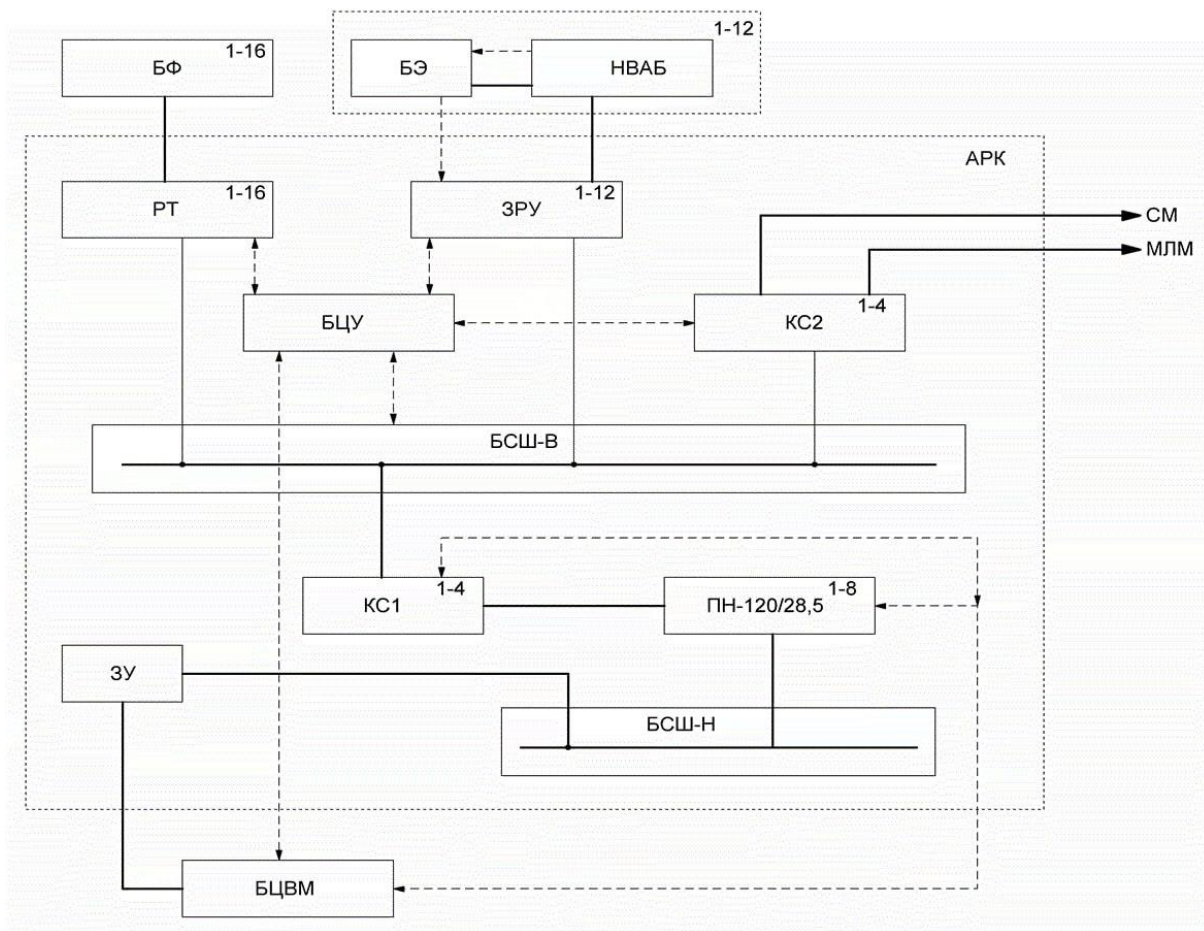


Рисунок 1 – Структура информационных связей СЭС НЭМ  
Figure 1 – Structure of power supply system information links

### Алгоритмизация процесса управления СЭС и АРК

Рассмотрим алгоритм управления зарядом и разрядом аккумуляторных батарей (АБ) с помощью АРК. На Рисунке 2 изображена структурная схема алгоритма разряда АБ, на Рисунке 3 изображена структурная схема алгоритма заряда АБ.

Как можно видеть из схемы алгоритма, АРК получает и передает в БВС разнообразный набор телеметрической информации, который используется при управлении блоком аккумуляторных батарей, в том числе при возникновении нештатных ситуаций.

Описание обозначений параметров телеметрии для реализации данных алгоритмов:

- $N$  – выбранный номер уставки ЗРУ;
- $P_c$  – среднее давление в аккумуляторах;
- $P_{в\text{у}31}$  – верхний уровень заряженности АБ $i$  при температуре АБ более  $T_{в\text{у}32}$ ;
- $P_{в\text{у}32}$  – верхний уровень заряженности АБ $i$  при температуре АБ не более  $T_{в\text{у}32}$ ;
- $P_{в\text{ыр}3}$  – верхний уровень заряженности АБ при температуре АБ не более  $T_{в\text{ыр}3}$ ;
- $T_c$  – Средняя температура в аккумуляторах;
- $T_{в\text{ыр}3}$  – предельно допустимая температура АБ при уровне заряженности  $P_{в\text{ыр}3}$ ;

$I_{зар}$  – ток заряда;  
 $T_{max}$  – предельно допустимая температура АБ на заряде;  
 $I_{раз}$  – ток разряда;  
 $W_{раз}$  – разрядная энергоемкость АБ;  
 $C_{раз}$  – разрядная емкость АБ;  
 $U_{аб}$  – напряжение АБ;  
 $U_{min}$  – минимальное напряжение в аккумуляторе батареи;  
 $T_{Вуз}$  – предельно допустимая температура АБ при уровне заряженности  $P_{Вуз2}$ .

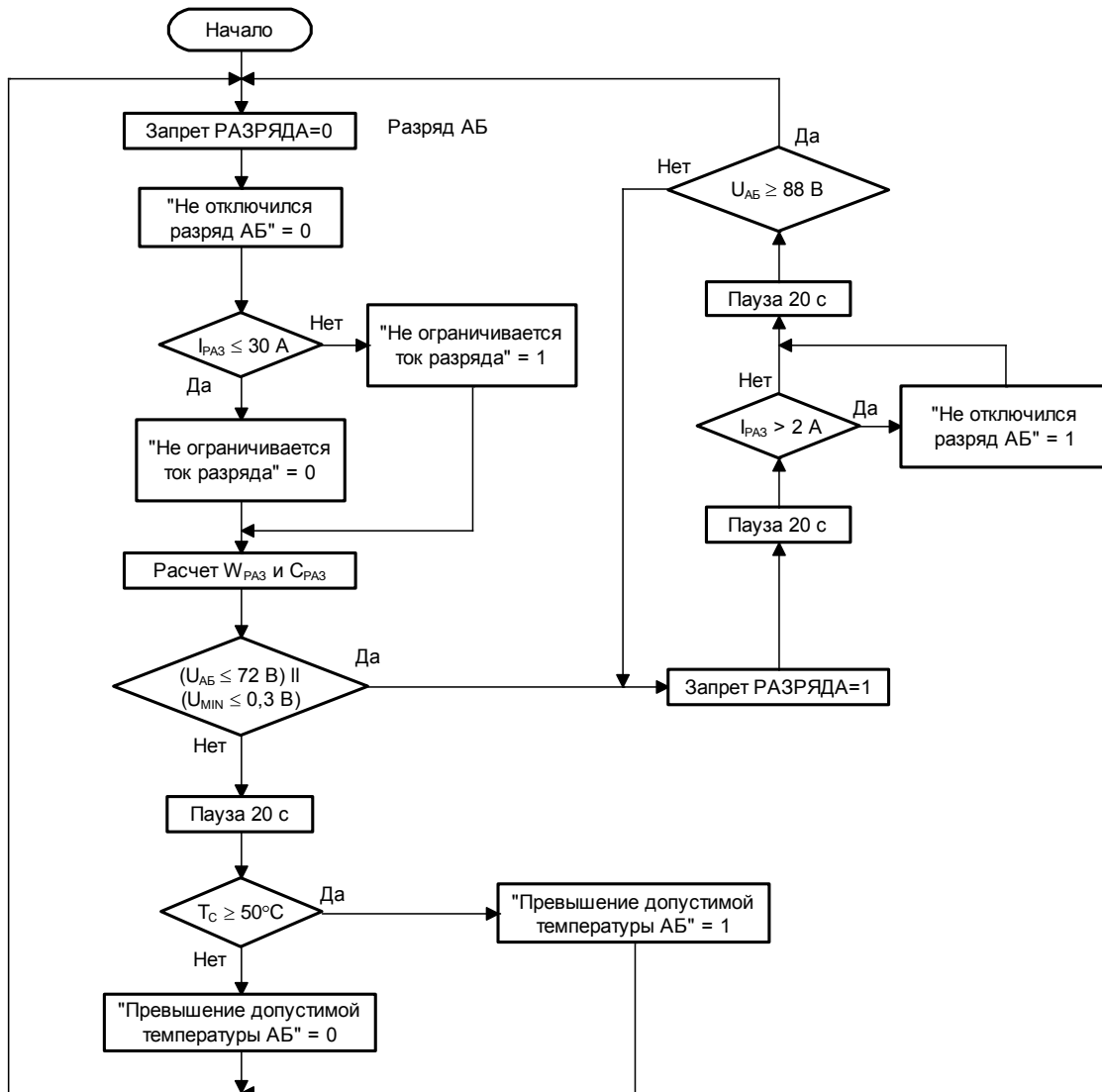


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма разряда АБ  
 Figure 2 – Block diagram of the battery discharge algorithm

Представленные алгоритмы качественно управляют процессом заряда и разряда аккумуляторных батарей, не позволяя им оказываться в режимах работы, при которых значения измеряемых телеметрических параметров становились бы критическими.

Однако алгоритм не учитывает процессы деградации аккумуляторных батарей, неизбежно происходящих при продолжительном использовании и регулярном повторении циклов заряда и разряда, несмотря на применение восстановительных циклов. Этот факт со временем может значительно отразиться на качестве управления.

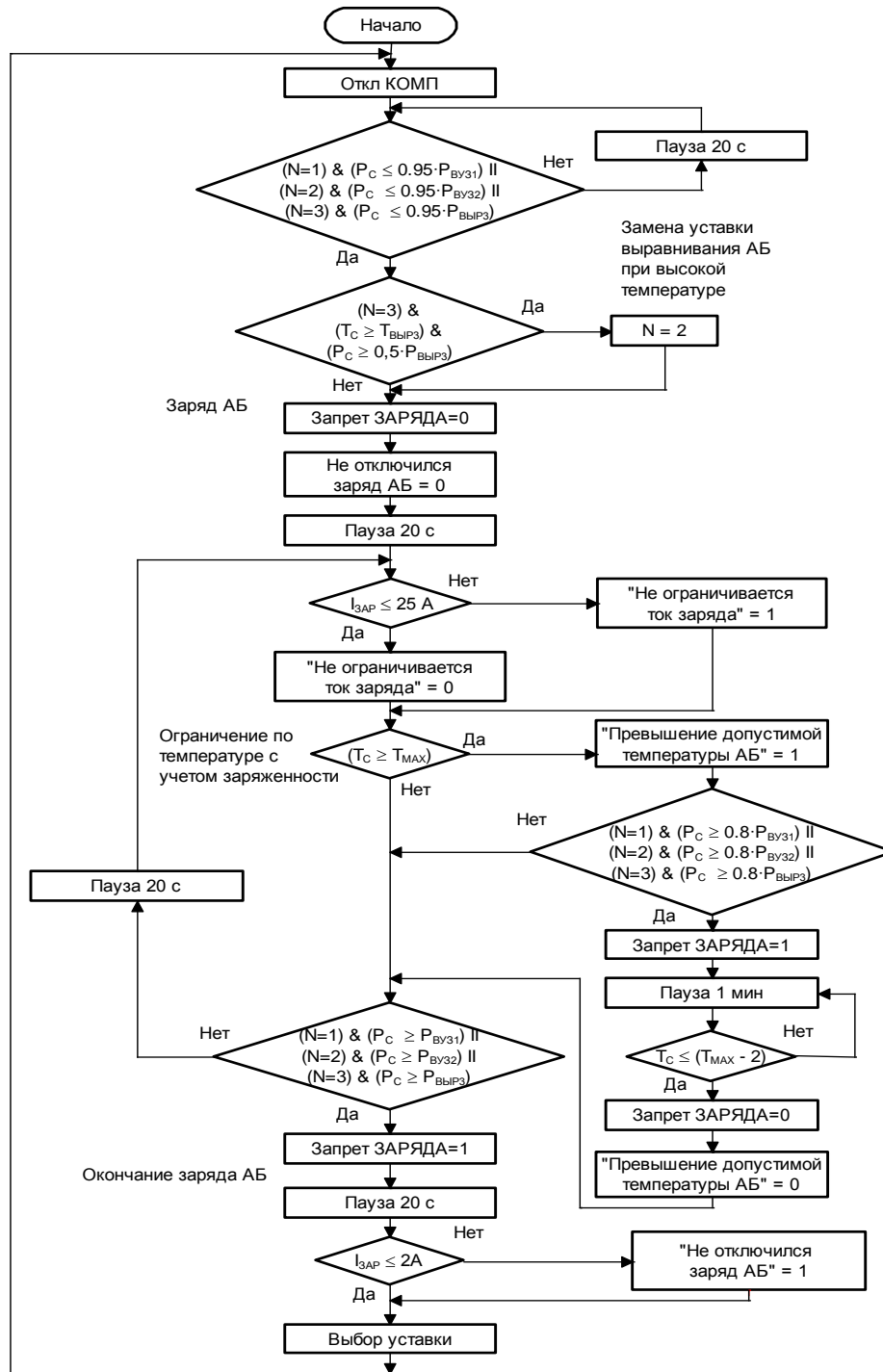


Рисунок 3 – Структурная схема алгоритма заряда АБ  
 Figure 3 – Block diagram of the battery charge algorithm

Кроме того, алгоритм не предусматривает анализ и выявление иных нестандартных ситуаций, вызванных воздействием неопределенных факторов. Например, влияние тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) на контроллеры управления и измерения и передачи телеметрии блока электроники аккумуляторных батарей.

Для решения проблемы учета изменяющихся со временем параметров аккумуляторов предлагается ввести в алгоритм управления дополнительные параметры, характеризующие износ аккумуляторов, такие как общее количество времени работы аккумуляторов, при которых уровень заряженности имел уровень от 80 до 90 % от

номинального, а также количество пройденных восстановительных циклов. Введение этих параметров позволит ввести дополнительные уставки для зарядных токов аккумуляторов, что положительно скажется на их сроке службы и надежности.

Ошибки в работе блоков электроники аккумуляторных батарей очень сложно учесть при текущей реализации алгоритма. Влияние ТЗЧ на блок электроники аккумуляторных батарей может привести к передаче ошибочной телеметрии, резкому изменению передаваемого значения какого-либо телеметрического параметра, искажению данных, измеряемых датчиками аккумуляторов.

Решением данной проблемы может служить разработка дополнительной системы помощи принятия решений, реализованной на основе нечеткой логики, нейронечеткой системы типа ANFIS или нейронной сети.

Исходя из этого, предлагается разработать модель нейронной сети и обучить ее на наборах телеметрических параметров, полученных при наземной отработке и штатной работе СЭС на орбите, и динамике их изменений, предшествующих наступлению критических режимов работы или наступлению нештатных ситуаций, с целью создания системы оповещения о возможном критическом режиме работы.

### Выводы

Как можно видеть из схемы алгоритма, АРК получает и передает в БВС разнообразный набор телеметрической информации, который используется при управлении блоком аккумуляторных батарей, в том числе при возникновении нештатных ситуаций.

При этом, в случае прогрессирующих отказов, некоторые неисправности требуют анализа оператором и ручной подачи команд для их устранения. Кроме того, возможность прогнозирования динамики отказов на основе предыдущих данных телеметрии, позволит увеличить надежность СЭС и, соответственно, всего космического аппарата.

Исходя из этого, можно сделать вывод о необходимости внесения изменений в алгоритм управления с целью его интеллектуализации.

При этом существует ряд научных работ, изучающих применение интеллектуализации в системах управления КА, диагностики бортовой аппаратуры [7, 8] и описывающие основные алгоритмы функционирования интеллектуальных систем [9, 10].

Таким образом, можно сделать вывод, что интеллектуальная система управления, совместно с имеющимся алгоритмом, позволит повысить надежность и долговечность СЭС, так и всего космического аппарата. Данная система найдет свое применение как в качестве интеллектуального средства автоматического принятия решений бортовой системой АРК, так и использовать ее прогнозы в качестве дополнительной переменной при разработке усовершенствованных алгоритмов управления СЭС.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмина Н.А. Система энергоснабжения космического аппарата. *Решетневские чтения*. 2017;21(1):274–276.
2. Гладышев Г.Н., Дмитриев В.С., Копытов В.И. *Системы управления космическими аппаратами: Учебное Пособие*. Томск: ТПУ; 2000. 207 с.
3. Шиняков Ю.А, Гуртов А.С., Гордеев К.Г., Ивков С.В. Выбор структуры систем электроснабжения низкоорбитальных космических аппаратов. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2010;1(21):103–113.

4. Савенков В.В., Тищенко А.К., Волокитин В.Н. Принципы построения аппаратуры регулирования и контроля современных систем электроснабжения малоразмерных космических аппаратов. *Решетневские чтения*. 2017;21(1):325–326.
5. Петровичев М.А., Гуртов А.С. *Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов: учебное пособие*. Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета; 2007. 87 с.
6. Аникин А.С. *Электропитание космических аппаратов: учебное пособие*. Томск: ТУСУР; 2014. 177 с.
7. Соколов Н.Л. Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций. *Успехи современного естествознания. Журнал Российской академии естествознания*. 2007;6:16–20.
8. Соколов Н.Л. Динамическая интеллектуальная система поддержки принятия решений при управлении автоматических космических аппаратов. *Отраслевая науч.-техн. конф. приборостроительных организаций Роскосмоса. Информационно-управляющие и измерительные системы*. 2011;56–61.
9. Осипов Г.С., Жилиякова Л.Ю., Виноградов А.Н. Динамические интеллектуальные системы. Представление знаний и основные алгоритмы. Моделирование целенаправленного поведения. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2002;6.
10. Соколов Н.Л., Селезнева И.А., Корниенко Ю.А. Использование интеллектуальных систем в управлении космическими аппаратами. *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*. 2015;19(3):29–36.

## REFERENCES

1. Kuz'mina N.A. Spacecraft power supply system. *Reshetnevskie chteniya*. 2017;21(1):274–276. (In Russ.).
2. Gladyshev G.N., Dmitriev V.S., Kopytov V.I. *Spacecraft control systems: Tutorial*. Tomsk: TPU; 2000. 207 p. (In Russ.).
3. Shinyakov Yu.A, Gurtov A.S., Gordeev K.G., Ivkov S.V. Selection of the structure of power supply systems for low-orbit spacecraft. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika = VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2010;1(21):103–113. (In Russ.).
4. Savenkov V.V., Tishchenko A.K., Volokitin V.N. Principles of construction of regulation and control equipment of modern power supply systems for small spacecrafts. *Reshetnevskie chteniya*. 2017;21(1):325–326. (In Russ.).
5. Petrovichev M.A., Gurtov A.S. *Power supply system of onboard spacecraft complex: tutorial*. Samara: Izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta; 2007. 87 p. (In Russ.).
6. Anikin A.S. *Spacecraft power supply: tutorial*. Tomsk: TUSUR, 2014. 177 p. (In Russ.).
7. Sokolov N.L. Basic principles of diagnostics of on-board automatic spacecraft operability and recommendations on abnormal situations elimination. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. Zhurnal Rossiiskoi akademii estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2007;6:16–20. (In Russ.).
8. Sokolov N.L. Dynamic Intelligent Decision Support System for Control of Automated Spacecraft. *Otraslevaya nauch.-tekhn. konf. priborostroitel'nykh organizatsii Roskosmosa. Informatsionno-upravlyayushchie i izmeritel'nye sistemy*. 2011;56–61. (In Russ.).



9. Osipov G.S., Zhilyakova L.Yu., Vinogradov A.N. Dynamic intelligent systems. Knowledge representation and basic algorithms. Modeling purposeful behavior. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Scientific Journal Founded (Cofounded) by the Russian Academy of Sciences*. 2002;6. (In Russ.).
10. Sokolov N.L., Selezneva I.A., Kornienko Yu.A. Use of intelligent systems in spacecraft control. *Vestnik MGUL – Lesnoi vestnik = Forestry Bulletin*. 2015;19(3):29–36. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Логинов Иван Владимирович**, аспирант, Воронежский государственный технический университет, АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [ivvlalog@yandex.ru](mailto:ivvlalog@yandex.ru)

**Ivan Vladimirovich Loginov**, Postgraduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Concern Sozvezdiye JSC, the Russian Federation.

**Бурковский Виктор Леонидович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)

**Victor Leonidovich Burkovsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

**Нетесов Григорий Андреевич**, инженер по наладке и испытаниям, АО «Орбита», Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [grisha.netyosov@yandex.ru](mailto:grisha.netyosov@yandex.ru)

**Grigory Andreevich Netesov**, Tuning and Testing Engineer, Orbita JSC, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 14.05.2023; принята к публикации 08.06.2023.*

*The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 14.05.2023; accepted for publication 08.06.2023.*