

УДК 629.78.036.72.075

doi: 10.32620/aktf.2020.1.01

А. В. ПОГУДИН, С. В. ГУБИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МИНИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ПОДГОТОВКИ РАБОЧЕГО ТЕЛА К ЗАПУСКУ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОНАГРЕВНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Предметом исследования в статье является процесс подготовки рабочего тела к запуску двигательной установки с электронагревным двигателем. **Целью** является минимизация времени подготовки рабочего тела к запуску за счет разработки алгоритма термостатирования и баростатирования элементов двигательной установки при ограниченной мощности системы энергоснабжения. **Задачи:** анализ структуры двигательной установки с электронагревным двигателем, выбор контроллера управления установкой, формирование алгоритма подготовки рабочего тела к первому запуску, исследование резерва времени подготовки рабочего тела к запуску при ограниченной мощности системы энергоснабжения, формирование алгоритма минимизации времени запуска. **Используемыми методами** являются: схемотехнический анализ, энергобаланс и алгоритмический анализ. **Получены следующие результаты:** проанализирована структурная схема двигательной установки, выбран блок управления на основе контроллера Arduino Leonardo, составлен алгоритм первого запуска, состоящий из процедур баростатирования бака, термостатирования парогенератора, баростатирования ресивера, термостатирования электронагревного двигателя, построена циклограмма запуска двигательной установки, построена циклограмма запуска с уменьшенным временем, сформирован алгоритм с минимальным временем запуска двигательной установки. **Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем: сформированы процедуры входящие в состав алгоритма подготовки рабочего тела к первому запуску двигательной установки, построена циклограмма подготовки рабочего тела к первому запуску, построена циклограмма сокращения времени подготовки рабочего тела к первому запуску установки на основе энергобаланса потребляемой мощности при ограничении выходных параметров энергоустановки, построен алгоритм сокращения времени подготовки рабочего тела к первому запуску двигательной установки с электронагревным двигателем, установлено значение времени запуска по модифицированному алгоритму первого запуска при ограниченных значениях мощности системы энергоснабжения.

Ключевые слова: космический аппарат; космический буксир; бортовая двигательная установка; электронагревный двигатель; рабочее тело; алгоритм первого запуска; циклограмма.

Введение

В настоящее время возрастает число запускаемых спутников с массой, не превышающей 10 кг. Данный вид спутников принято называть наноспутниками [1]. Эти спутники используются для изучения поверхности Земли, изучения ближнего и дальнего космоса, а также обучения и отработки новых технологий. Малая масса и габариты позволяют выводить на околоземную орбиту от нескольких единиц до нескольких десятков таких аппаратов и создавать на их основе космическую группировку [2]. В большинстве случаев малые космические аппараты (МКА) массой до 10 кг не оснащаются бортовой двигательной установкой (БДУ). Поэтому возникает необходимость решения транспортной задачи их орбитального маневрирования на заданную позицию другими средствами. Это возможно выполнить разгонным блоком (РБ) конечной ступени ракеты

космического назначения, либо применяя одноступенчатый космический буксир (КБ). Каждый из представленных видов носителей имеет в своем составе БДУ. Применяя КБ с жидкостной ракетной двигательной (ЖРД) установкой, можно получить выигрыш по времени создания группировки. Это обеспечивается большей силой тяги, чем у электроракетных установок [3]. При использовании электроракетной двигательной (ЭРД) установки, снижается необходимый запас рабочего тела (РТ), в связи с его малым расходом за счет подводимой электроэнергии при одинаковом суммарном импульсе с ЖРД. Для задачи буксировки малых космических аппаратов наиболее выгоден электронагревный двигатель за счет малого времени совершения маневра, при ограниченной удельной тяге [2].

Применение ЭРД в качестве БДУ на низкой околоземной орбите [4] ограничивается рядом факторов: время набора максимальной тяги, число за-

пусков, время одного запуска. Для выведения группировки МКА на заданную орбитальную позицию будет использован одноступенчатый КБ, оснащенный электронагревным двигателем (ЭНД). В качестве РТ в ЭНД применяется аммиак. Преимущество ЭНД, это малый запас топлива, высокий удельный импульс, высокая степень электромагнитной совместимости. Недостатком является длительное время подготовки РТ к запуску, малая тяга относительно ЖРД.

При применении ЭНД в составе БДУ актуально снижение времени подготовки, времени запуска и времени отключения БДУ. Для ЭНД были получены характеристики запуска [5], представляющие собой зависимости тяги, расхода РТ и мощности нагревателя двигателя при запуске от времени. Остановка двигателя не менее важная характеристика, чем запуск. В процессе остановки двигателя существует импульс последствия (импульс тяги, создаваемый в процессе отключения подачи РТ в двигатель), обусловленный истечением остатков РТ из полости двигателя. Данный импульс необходимо учитывать при разработке алгоритма остановки двигателя. Объединяя процедуры подготовки, запуска и отключения БДУ, можно получить алгоритм управления БДУ.

1. Постановка задачи

Применяя ЭНД на КБ необходимо минимизировать время подготовки РТ к первому запуску БДУ, поскольку он наиболее длительный и включает процесс начального разогрева бака, парогенератора и двигателя. Процесс минимизации времени подготовки может быть определен в ряде этапов:

- анализ структуры БДУ с точки зрения управления процессом,
- выбор контроллера управления БДУ для реализации в данной структуре,
- формирование алгоритма подготовки РТ к первому запуску БДУ,
- исследование резерва времени подготовки РТ к запуску БДУ,
- минимизация времени в алгоритме запуска БДУ.

Для анализа структуры БДУ, рассмотрим «классическую» схему электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) с ЭНД [6] (рис. 1).

На рисунке представлены: СЭС – система электроснабжения, СУ ЭРД – система управления электроракетным двигателем, СХПРТ – система хранения и подачи рабочего тела, ЭНД – электронагревный двигатель.

Для управления БДУ необходим блок управления (БУ), который реализует алгоритм подготовки

РТ к запуску. БУ должен быстро и точно обрабатывать команды, находящиеся в процедурах алгоритма. За основу БУ БДУ в рамках постановки данной задачи принят контроллер Arduino Leonardo [7] (рис. 2), реализованный на Atmega-32U (табл. 1), что позволяет выполнять необходимые функции управления, измерения и контроля для структуры БДУ.

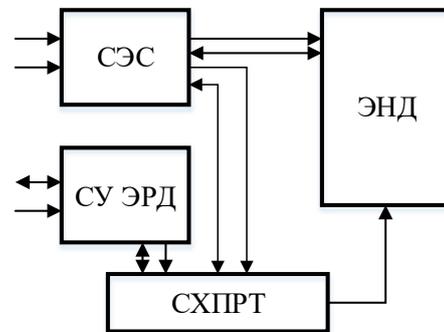


Рис. 1. Структурная схема ЭРДУ МКА на базе ЭНД



Рис. 2. Arduino Leonardo подключенный к БДУ

Таблица 1.

Характеристики Arduino Leonardo

Наименование	Характеристика
Микроконтроллер	ATmega32u4
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7-12 В
Входное напряжение (предельное)	6-20 В
Цифровые Входы/Выходы	20 (7 из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Аналоговые каналы	12
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
Флеш-память	32 Кб (ATmega32u4) из которых 4 Кб используются для загрузчика
ОЗУ	2 Кб (ATmega32u4)
EEPROM	1 Кб (ATmega32u4)
Тактовая частота	16 МГц

Arduino Leonardo — контроллер на базе ATmega32u4. Платформа имеет 20 цифровых вход/выходов (7 из которых могут использоваться как выходы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и 12 как аналоговые входы), кварцевый генератор 16 МГц, разъем микро-USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

Основные характеристики Arduino Leonardo представлены в таблице 1.

Для защиты элементов управления от перенапряжения используются ключи на транзисторах. Электроклапана находящиеся в БДУ, а также нагревательные элементы бака, парогенератора, ресивера и двигателя включаются при 24 В, поэтому в системе управления используются полевые транзисторы [8]. Схема подключения БУ к объекту управления представлена на рис. 3.

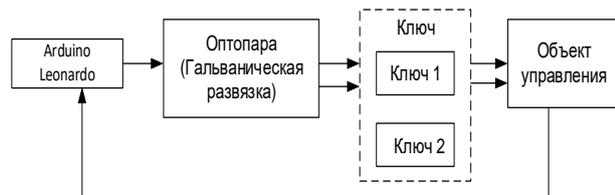


Рис. 3. Схема подключения БУ к БДУ

2. Решение задачи

Проанализировав структурную схему см. рис. 1 и выбрав необходимый контроллер в качестве БУ, перейдем к формированию алгоритма подготовки [9] РТ к первому запуску БДУ. В процессе подготовки в элементах БДУ выполняется термостатирование (доведение температуры оборудования и РТ до заданного значения и удержание ее в заданном диапазоне) и баростатирование (доведение давления РТ внутри оборудования до заданного значения и удержание его в заданном диапазоне).

Сформируем перечень процедур входящих в состав алгоритма первого запуска БДУ:

1) Процедура включения БДУ (ПВБДУ) — включает питание измерительных и телеметрических датчиков, задействует канал регистрации показаний измерительных датчиков, задействует массив предустановок (МП) давления, температуры и мощности нагревателей в БДУ;

2) Процедура отключения БДУ (ПОБДУ) — отключает питание телеметрических датчиков, после отключения питания данные из датчиков сохраняются в массив;

3) Процедура баростатирования бака (ПББ) — включает питание канала баростатирования бака, сопоставляет давление в баке с давлением МП, задействует нагреватель бака, в случае отказа формирует ошибку «отказ в работе бака», при достижении давления равного предустановленному в МП, отключает нагреватель и включает электроклапан бака, формирует команду «бак готов»;

4) Процедура термостатирования парогенератора (ПТП) — включает питание канала термостатирования парогенератора (ПГ), сопоставляет температуру в канале РТ ПГ с температурой в МП, задействует нагреватель ПГ, в случае отказа формирует ошибку «отказ в работе ПГ», при достижении температуры равной предустановленной в МП, отключает нагреватель и включает электроклапан ПГ, формирует команду «ПГ готов»;

5) Процедура баростатирования ресивера (ПБР) — включает питание канала баростатирования ресивера, сопоставляет давление в ресивере с давлением МП, если давление меньше открывает приемный электроклапан и поднимает давление до заданного в МП, после чего закрывает приемный электроклапан, формирует команду «ресивер готов»;

6) Процедура термостатирования двигателя (ПТД) — включает питание канала термостатирования двигателя, сопоставляет температуру в канале РТ двигателя с температурой в МП, задействует нагреватель двигателя, в случае отказа формирует ошибку «отказ в работе двигателя», при достижении температуры равной предустановленной в МП, отключает нагреватель и включает ПВБДУ, формирует команду «двигатель готов»;

7) Процедура остановки термостатирования двигателя (ПОТД) — сбрасывает команду «двигатель готов» отключает нагреватель двигателя, отключает питание канал термостатирования двигателя;

8) Процедура включения двигателя (ПВД) — включает выпускной электроклапан ресивера, включает электроклапан двигателя, запускает таймер отсчета времени работы двигателя с сохранением его в параметр «время работы»;

9) Процедура остановки двигателя (ПОД) — выключает электроклапан двигателя, останавливает отсчет таймера и сохраняет параметр «время», выключает выпускной электроклапан ресивера, передает время работы в массив предустановок и обнуляет параметр «время».

Алгоритм подготовки РТ к первому включению БДУ приведен на рис. 4. В случае отказа всех режимов термостатирования и баростатирования БДУ продлжает работу в режиме газореактивной двигательной установки с повышенным расходом РТ.

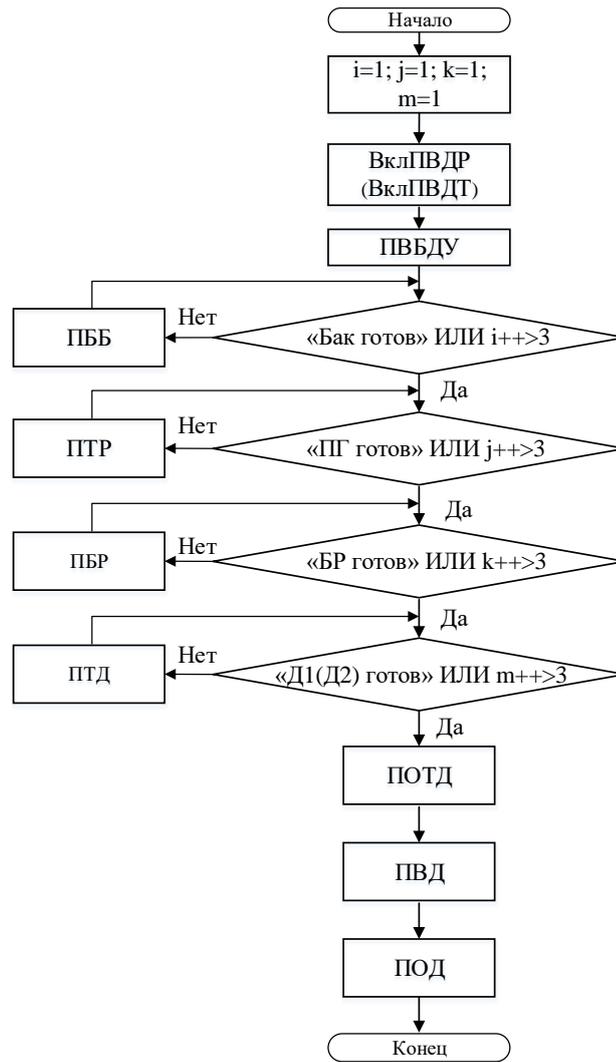


Рис. 4. Алгоритм подготовки РТ к первому включению БДУ

Циклограмма работы БДУ, при максимальной потребляемой мощности 224 Вт, в непрерывном режиме с момента поступления команды от БУ на включение в режиме термостатирования и баростатирования представлена на рис. 5. Она сформирована из условий применения БДУ для МКА [10] и ограничивается максимальной мощностью потребления 225 Вт, что соответствует мощности СЭС МКА. На циклограмме в виде ступеней величиной 2 Вт и продолжительностью 0,18 с, показано время открытия электроклапанов, соответствующих элементов БДУ. Из циклограммы следует, что максимальная суммарная мощность, необходимая для потребителей БДУ, не превышает 322 Вт.

Из энергобаланса следует, что для сокращения времени подготовки РТ к первому запуску БДУ, необходимо одновременно проводить процессы в узлах БДУ. Следовательно, для уменьшения времени запуска необходимо одновременно проводить нагрев бака, двигателя и парогенератора, что будет

предъявлять к СЭС КБ требования повышения отдаваемой мощности. Имеем следующие варианты термостатирования и баростатирования:

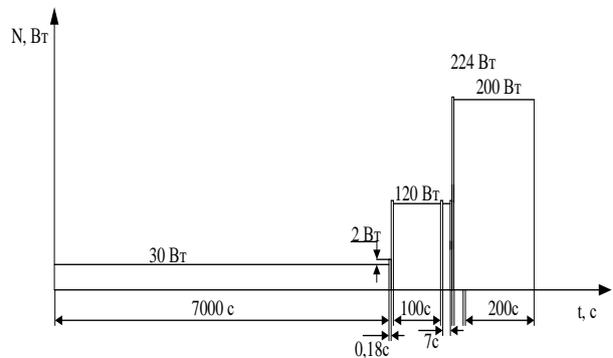


Рис. 5. Циклограмма подготовки РТ к первому запуску БДУ

- бак и парогенератор нагреваются одновременно, затем нагревается двигатель,
- бак и двигатель нагреваются одновременно, затем разогревается парогенератор,
- бак, парогенератор, двигатель греются одновременно.

Наиболее минимальным по времени является вариант одновременного нагрева всех элементов БДУ, но этот вариант потребует наибольшей мощности энергоустановки КБ. Тогда при одновременной нагрузке на СЭС всех потребителей, включая электроклапаны и контроллер, максимальная потребляемая мощность составит 350 Вт.

Очевидно, что основной резерв сокращения времени подготовки состоит в увеличении мощности нагревателя бака РТ. При ограничении потребления 350 Вт, возможно подавать 130 Вт на нагреватель бака. Циклограмма примет вид, представленный на рис. 6.

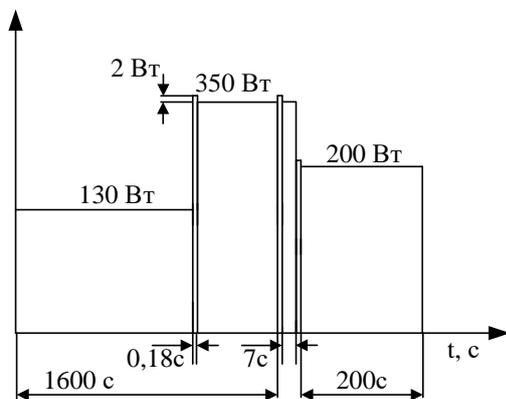


Рис. 6. Циклограмма сокращения времени подготовки РТ к первому запуску БДУ

В соответствии с циклограммой, алгоритм первого запуска БДУ примет вид, представленный на рис. 7.

Заключение

В статье проведено исследование минимизации времени подготовки РТ к первому запуску БДУ. Для этого поведен анализ структурной схемы БДУ с электронагревным двигателем. Предложено использование контроллера Arduino Leonardo в качестве БУ БДУ. Сформирован алгоритм, состоящий из процедур, необходимых для подготовки РТ. Построена циклограмма подготовки РТ к первому запуску БДУ. На основании ее анализа предложен метод сокращения времени подготовки РТ за счет увеличения мощности нагревателя бака БДУ. При

увеличении мощности, подаваемой на нагреватель бака БДУ с 30 Вт до 130 Вт, одновременном термостатировании и баростатировании элементов БДУ, ограничении максимальной потребляемой мощности 350 Вт, время подготовки РТ к первому запуску БДУ сократилось в 4 раза.

Для реализации такого решения необходимо в СЭС МКА предусмотреть резерв мощности относительно базовой в 36%. Это реализуемо на КБ с учетом удельных показателей мощности солнечных батарей (~ 400 Вт/м² и удельной массе 2,8 кг/м²) для КБ массой 150 кг составит дополнительную массу 0,5%.

Литература

1. Овчинников, М. Ю. *Малые мира сего [Текст]* / М. Ю. Овчинников // *Компьютерра*. – 2007. – № 15. – С. 37-43.
2. Погудин, А. В. *Особенности рационального управления двигательных установок для формирования спутниковой группировки [Текст]* / А. В. Погудин, С. В. Губин // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Харьков, 2017. – Вып. 78. – С. 74-82.
3. Kwak, Hyun-Duck *Performance assessment of electrically driven pump-fed LOX/kerosene cycle rocket engine: Comparison with gas generator cycle [Text]* / Hyun-Duck Kwak, Sejin Kwon, Chang-Ho Choi // *Aerospace Science and Technology*. – 2018. – No. 77. – P. 67–82.
4. *Low Earth Orbit Satellite Design [Text]* / G. Sebestyen, S. Fujikawa, N. Galassi, A. Chuchra. – Springer International Publishing AG, 2018. – 320 p.
5. Погудин, А. В. *Математическое моделирование электронагревного двигателя на этапе запуска [Текст]* / А. В. Погудин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 5(157). – С. 4-12.
6. *Схемы энергетических и двигательных установок для космических аппаратов [Текст] : учеб. пособие* / К. В. Безручко, С. Ю. Нестеренко, С. А. Огиенко, С. В. Синченко. – Харьков : Изд-во Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2016. – 180 с.
7. Kushner, D. *The Making of Arduino [Electronic resource]* / D. Kushner. – Access mode: <http://web.eecs.umich.edu/~prabal/teaching/resources/eecs582/kushner11arduino.pdf> – 21.11.2019.

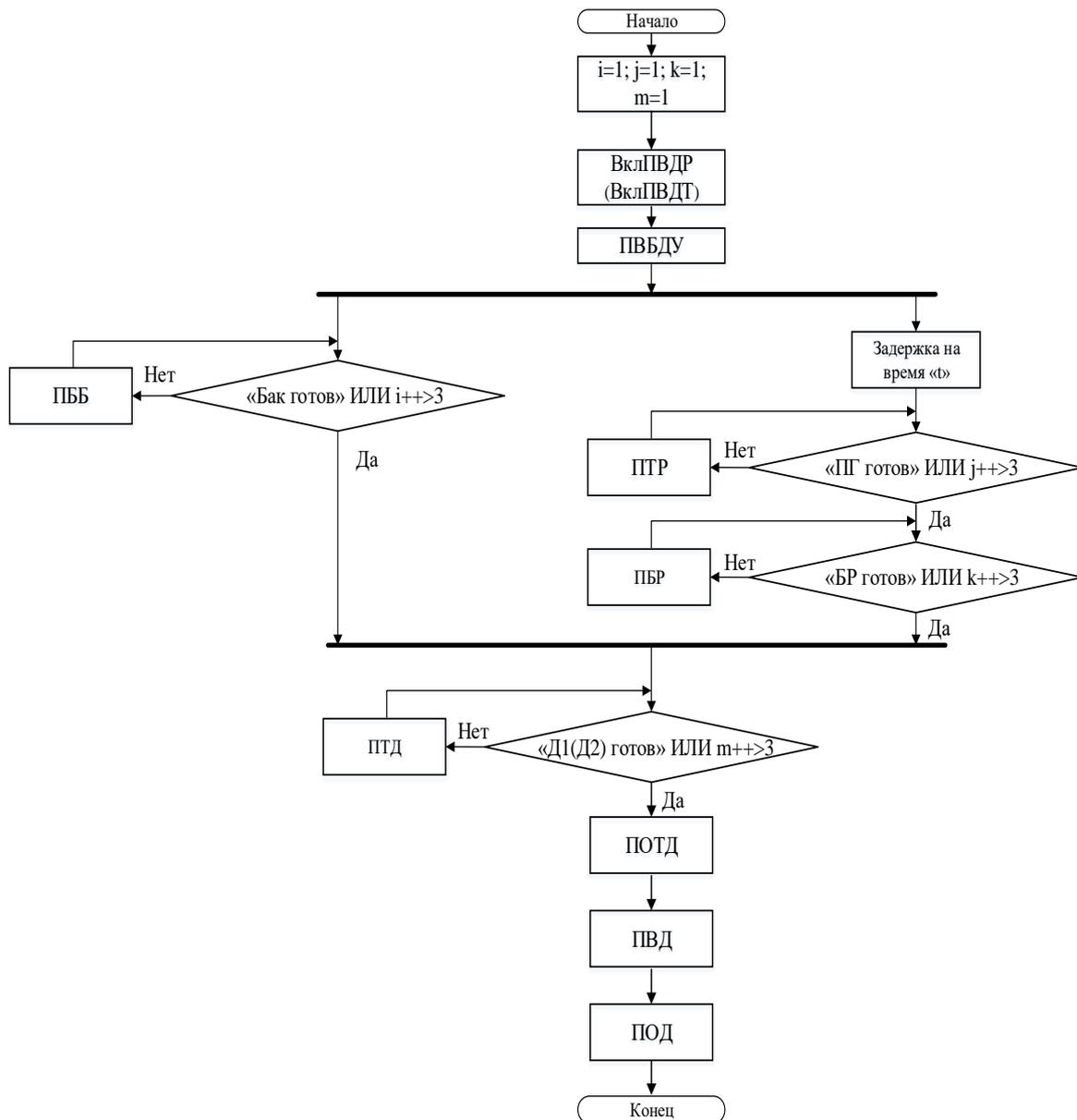


Рис. 7. Алгоритм с сокращенным временем подготовки РТ к первому включению БДУ

8. Lorenzo, F. Musgrave Overview of rocket engine control [Electronic resource] / F. Lorenzo, L. Jeffrey. – Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/98af/8f19eb5ff612620d905a27319be172efa520.pdf> – 21.11.2019.

9. Hubber, D. A. SEREN – a new SPH code for star and planet formation simulations [Electronic resource] / D. A. Hubber, C. P. Batty, A. P. Whitworth. – Access mode: https://www.academia.edu/5190114/SEREN_-_A_new_SPH_code_for_star_and_planet_formation_simulations – 21.11.2019.

10. Ховренко, М. В. Проблемы и пути решения при создании двигательных установок малой тяги на базе электронегревного двигателя с рабочим телом аммиак [Текст] / М. В. Ховренко и др. // От-

крытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2017. – Вып. 75. – С. 62-75.

References

1. Ovchinnikov, M. Yu. *Malye mira sego* [Small worlds]. Komp'yuterra, 2007, no. 15, pp. 37-43.
2. Pogudin, A. V., Gubin, S. V. Osobennosti ratsional'nogo upravleniya dvigatel'nykh ustanovok dlya formirovaniya sputnikovoi gruppировки [Features of the rational control of propulsion systems for the formation of a satellite constellation]. *Otkrytye informatsionnye i*

komp'yuternye integrirovannye tekhnologii – Open information and computer integrated technologies, 2017, no. 78, pp. 74-82.

3. Kwak, Hyun-Duck, Kwon, Sejin, Choi, Chang-Ho. Performance assessment of electrically driven pump-fed LOX/kerosene cycle rocket engine. Comparison with gas generator cycle. *Aerospace Science and Technology*, 2018, no. 77, pp. 67–82.

4. Sebestyen, G., Fujikawa, F., Galassi, N., Chuchra, A. *Low Earth Orbit Satellite Design* Springer. International Publishing AG, 2018, 320 p.

5. Pogudin, A. V. Matematicheskoe modelirovanie elektronagrevnogo dvigatelya na etape zapuska [Mathematical modeling of an electric heating engine at the start-up phase]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2019, no. 5/157, pp. 4-12.

6. Bezruchko, K. V., Nesterenko, S. Yu., Ogienko, S. A., Sinchenko, S. V. *Skhemy energeticheskikh i dvigatel'nykh ustanovok dlya kosmicheskikh apparatov* [Schemes of power and propulsion systems for spacecraft]. Kharkov, Izd-vo Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «KhAI» Publ., 2016, 180 p.

7. Kushner, D. *The Making of Arduino*. Available at: <http://web.eecs.umich.edu/~prabal/teaching/resources/eecs582/kushner11arduino.pdf> (accessed 21.11.2019).

8. Lorenzo, F., Jeffrey, L. *Musgrave Overview of rocket engine control*. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/98af/8f19eb5ff612620d905a27319be172efa520.pdf> (accessed 21.11.2019).

9. Hubber, D. A., Batty, C. P., Whitworth, A. P. *SEREN – a new SPH code for star and planet formation simulations*. Available at: https://www.academia.edu/5190114/SEREN_-_A_new_SPH_code_for_star_and_planet_formation_simulations (accessed 21.11.2019).

10. Khovrenko, M. V. et al. Problemy i puti resheniya pri sozdanii dvigatel'nykh ustanovok maloi tyagi na baze elektronegrevnogo dvigatelya s rabochim telom ammiak [Problems and solutions when creating low-thrust propulsion systems based on electric heating engine with a working fluid ammonia]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii – Open information and computer integrated technologies*, 2017, no. 75, pp. 62-75.

Поступила в редакцію 12.12.2019, рассмотрена на редколлегии 20.01.2020

МІНІМІЗАЦІЯ ЧАСУ ПІДГОТОВКИ РОБОЧОГО ТІЛА ДО ЗАПУСКУ РУШІЙНОЇ УСТАНОВКИ З ЕЛЕКТРОНАГРЕВНИМ ДВИГУНОМ

А. В. Погудін, С. В. Губін

Предметом дослідження в статті є процес підготовки робочого тіла до запуску рушійної установки з електронагрівним двигуном. Метою є мінімізація часу підготовки робочого тіла до запуску за рахунок розробки алгоритму термостатування та баростатування елементів рушійної установки при обмеженій потужності системи енергопостачання. Завдання: аналіз структури рушійної установки з електронагрівним двигуном, вибір контролера керування установкою, формування алгоритму підготовки робочого тіла до першого запуску, дослідження резерву часу підготовки робочого тіла до запуску при обмеженій потужності системи енергопостачання, формування алгоритму мінімізації часу запуску. Використовуваними методами є: схематичний аналіз, енергобаланс і алгоритмічний аналіз. Отримані наступні результати: проаналізована структурна схема рухової установки, обрано блок керування на основі контролера Arduino Leonardo, складено алгоритм першого запуску, що складається з процедур баростатування бака, термостатування парогенератора, баростатування ресивера, термостатування електронагрівного двигуна, побудована циклограма запуску рушійної установки, побудована циклограма запуску зі зменшеним часом, сформовано алгоритм з мінімальним часом запуску рушійної установки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: сформовані процедури, що входять до складу алгоритму підготовки робочого тіла до першого запуску рушійної установки, побудована циклограма підготовки робочого тіла до першого запуску, побудована циклограма скорочення часу підготовки робочого тіла до першого запуску установки на основі енергобалансу споживаної потужності при обмеженні вихідних параметрів енергоустановки, побудовано алгоритм скорочення часу підготовки робочого тіла до першого запуску рушійної установки з електронагрівним двигуном, встановлено значення часу запуску за модифікованим алгоритмом першого запуску при обмежених значеннях потужності системи енергопостачання.

Ключові слова: космічний апарат; космічний буксир; бортова рухова установка; електронагрівний двигун; робоче тіло; алгоритм першого запуску; циклограма.

MINIMIZING THE PREPARATION TIME OF THE WORKER TO START ENGINE INSTALLATION WITH ELECTRIC HEATING ENGINE*A. V. Pohudin, S. V. Gubin*

The subject of the research in the article is the process of preparing the working fluid for launching an engine installation with an electric heating engine. The goal is to minimize the time for preparing the working fluid for launch by developing an algorithm for thermostating and barostating of elements of a propulsion system with limited power of the power supply system. Tasks: analysis of the structure of a propulsion system with an electric heating engine, selection of an installation control controller, the formation of an algorithm for preparing the working fluid for the first launch, the study of the reserve time for preparing the working fluid for launch with limited power supply system, the formation of an algorithm for minimizing the starting time. The methods used are: circuit analysis, energy balance and algorithmic analysis. The following results were obtained: the structural diagram of the propulsion system was analyzed, a control unit based on the Arduino Leonardo controller was selected, the first start-up algorithm was compiled, which consisted of the barostating of the tank, thermostating of the steam generator, barostating of the receiver, and thermostating of the electric heating engine; A start-up cyclogram with reduced time was constructed, an algorithm with a minimum start-up time of the propulsion system was formed. The scientific novelty of the results is as follows: the procedures included in the algorithm for preparing the working fluid for the first launch of the propulsion system are formed, a cyclogram for preparing the working fluid for the first launch is constructed, a cyclogram for reducing the time for preparing the working fluid for the first launch of the installation is constructed based on the energy balance of power consumption with limitation power plant output parameters, an algorithm for reducing the preparation time of the working fluid for the first launch of a propulsion system with an electric heating engine was built, the value of the start time was established by the modified first start algorithm with limited values of the power supply system.

Keywords: spacecraft; spacecraft; on-board propulsion system; electric heat engine; working fluid; first-run algorithm; cyclogram.

Погудин Андрей Владимирович – аспирант кафедры космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Губин Сергей Викторович – канд. техн. наук, проф. каф. космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Pogudin Andrey Vladimirovich – PhD student of Dept. of Space Technology and Unconventional Energy Sources, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: andrey.pohudin@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8673-2119>

Gubin Sergii Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Professor of Dept. of Space Technology and Unconventional Energy Sources, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: s.gubin@khai.edu.