

Автоматизация анализа нормативности работы бортового вычислительного устройства космического аппарата

Табачков Е.В.^{1,2*}, Зинина А.И.^{2}**

*¹Московское опытно-конструкторское бюро «Марс»,
1-й Щемилковский пер., 16, стр. 2, Москва, 127473, Россия*

*²Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: e-tab@rambler.ru*

***e-mail: zinina0818@mail.ru*

Статья поступила 15.07.2020

Аннотация

Целью работы является дальнейшее развитие автоматизированного анализа нормативности вычислительного процесса бортовых вычислителей космических аппаратов. Ранее предложенный подход обеспечивал лишь возможность анализа нормативности времён работы программных модулей в части их соответствия отведённым временным интервалам. В данной работе предложен новый алгоритм, который позволяет также проверять корректность работы вычислителя путём сравнения значений параметров в телеметрической информации (ТМИ), характеризующих его состояние в момент начального включения, с номинальными. На основе предложенного алгоритма реализовано программное средство. В результате увеличения числа учитываемых при формировании суждения о нормативности вычислительного процесса критериев возрос объём анализа, который может быть осуществлён автоматически.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовое вычислительное устройство, телеметрическая информация, контроль нормативности, автоматизация анализа.

Введение

Разработка космического аппарата (КА) и обеспечение его нормативной работы является крайне непростой задачей, так как в его состав входит ряд сложнейших компонентов [1, 2, 3, 4]. Одним из таких компонентов является его система управления (СУ) [5]. Данная система в ходе функционирования КА решает вопросы, связанные с обеспечением условий, которые необходимы для решения его целевой задачи. Поэтому, в ходе разработки и эксплуатации СУ огромное внимание уделяется задаче обеспечения её безотказного функционирования [6]. Очевидно, что нормативная работа всей системы в целом зависит от правильности работы отдельных её компонентов.

Основным блоком системы управления (СУ) космического аппарата является бортовое вычислительное устройство (БВУ), которое представляет собой резервированный вычислитель [7, 8, 9]. В своём составе оно содержит четыре идентичных микроконтроллера («границы» вычислителя). В процессе работы СУ на данном устройстве происходит выполнение модулей бортового программного обеспечения (БПО), которые определяют её поведение [10, 11]. Следовательно, от нормативности работы БВУ зависит корректность функционирования всей СУ. Поэтому является крайне важным тщательно проверить его работу во всех возможных режимах на испытательных стендах. Способом контроля нормативности

является анализ телеметрической информации КА в части значений тех признаков, которые характеризуют различные аспекты функционирования БВУ и работы модулей БПО [12, 13].

Данные признаки можно условно разделить на несколько групп:

- Результаты расширенного теста встроенного контроля (РТВК);
- Времена завершения работы программных модулей;
- Другие признаки.

РТВК всегда выполняется при включении БВУ и включает в себя: проверку команд процессора, регистров специального назначения, таймеров, оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), корневого и страничного репрограммируемого запоминающего устройства.

Массивы времён завершения работы ПМ содержат информацию о временах завершения программных модулей (ПМ) БПО на гранях вычислителя. Анализ времён работы данных модулей является крайне важным, т.к. рассматриваемая СУ является системой «жёсткого» реального времени и время работы каждого ПМ чётко регламентируется [14, 15]. Информация об установленных для каждого модуля временных рамках содержится в циклограмме вычислителя. Выход модуля за установленный временной интервал может привести к сбою системы. Поэтому необходимо осуществлять анализ соответствия времён работы ПМ отведённым.

Также существует ряд других признаков, характеризующих работу вычислителя, которые не вошли в предыдущие группы, например: слово

конфигурации БВУ, номер циклограммы, признаки наличия питания в гранях БВУ и т.п.

Существующий метод анализа заключается в том, что исходный бинарный файл с ТМИ расшифровывается специальной программой. В результате её работы получается текстовый документ, содержимое которого представлено в понятном человеку виде. Далее сотрудники предприятия извлекают из него нужную информацию и проводят анализ полученных данных. Этот подход является крайне простым, однако имеет ряд существенных недостатков:

- Необходимость больших усилий со стороны сотрудников предприятия;
- Высокая вероятность ошибок из-за «человеческого фактора»;
- Для осуществления ручного анализа требуется определённое время,

следовательно, он не позволяет оперативно находить отклонения от нормы.

Поэтому представляет интерес автоматизация проведения подобного анализа путём разработки специального алгоритма и разработки на его основе программного средства. Ранее подобная работа уже проводилась, однако предыдущий алгоритм анализа позволял проводить анализ нормативности работы БВУ лишь в части контроля нормативности времён работы ПМ [16, 17, 18]. Таким образом, целью данной работы является развитие созданного ранее подхода путём добавления анализа в части критериев, характеризующих работу БВУ.

Исходные данные

В качестве исходных данных для анализа выступают бинарные файлы, содержащие ТМИ. Данные файлы формируются в процессе проведения проверок на испытательных стендах. Формат сведений, содержащихся в них, следующий:

- Время формирования информации;
- Идентификатор;
- Значение.

Нормативные времена завершения работы ПМ БПО содержатся в файле циклограммы. В нём содержатся циклограммы работы вычислителя в различных режимах. Формат сведений, содержащихся в циклограмме, следующий:

- Имя циклограммы;
- Нормативные времена завершения ПМ;
- Названия ПМ.

Требования по разработке средства для автоматизированного анализа

Требования на разработку средства автоматизированного анализа разработаны с учётом необходимости обеспечить удобство его использования. Также принято во внимание, что на предприятии к настоящему моменту проведена значительная работа по автоматизации проведения стендовых испытаний. С этой целью создана система автоматизации испытаний (САИ) [19, 20]. Эта система создана с целью автоматизированной фиксации ТМИ, получаемой в результате стендовых испытаний и её записи в общую базу данных предприятия. Кроме того, САИ

позволяет автоматизировано производить загрузку исходных данных, запуск обработки и запись результатов в базу данных, что может помочь решению поставленной задачи.

Исходя из вышесказанного, сформулированы следующие требования:

- Возможность запуска и задания параметров работы как в диалоговом режиме с графическим интерфейсом, так и в автоматическом;
- Возможность взаимодействия с существующими средствами автоматизации — средствами системы автоматизации испытаний (САИ), возможность взаимодействия с базами данных;
- Представление результатов анализа в удобном виде.

Предлагаемый алгоритм

На рисунке представлена блок-схема предлагаемого алгоритма.

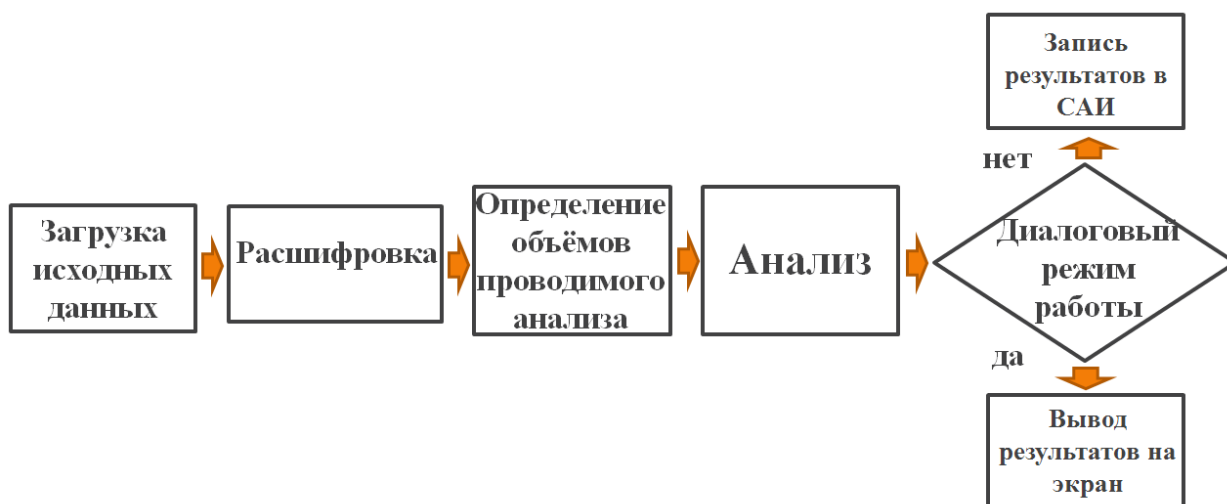


Рис.1. Блок-схема предлагаемого алгоритма

Алгоритм анализа

На первом этапе происходит загрузка входных данных, которые затем расшифровываются. Исходя из объёма сведений, содержащихся в ТМИ, определяются объёмы проводимого анализа. Также по значению специального признака в ТМИ определяется режим работы вычислителя. Исходя из того, какой режим зафиксирован, устанавливаются нормативные значения признаков, соответствующих данному режиму.

Процедура анализа состоит из следующих этапов:

- Сравнение зафиксированных по ТМИ значений признаков с нормативными. Формирование суждения о нормативности выполнения режима БВУ;
- Вычисление фактических времён работы ПМ в гранях вычислителя и сравнение с допустимыми согласно циклограмме. Формирование суждения о нормативности выполнения циклограммы БВУ;
- Формирование общего суждения о нормативности работы БВУ.

В случае если программа вызвана в ручном режиме, то результаты анализа следует отображать в графическом диалоговом окне, а если в автоматическом – записывать в базу данных предприятия.

Программная реализация

Разработка приложения велась на основе предложенного выше алгоритма с использованием среды Qt Creator на языке C++. Номинальные значения признаков, характеризующих нормативность вычислительного процесса, жёстко запомнены в

программе. Для остальных данных, необходимых для проведения анализа нормативности (файлы с ТМИ и информацией циклограмм), реализованы средства загрузки.

Предусмотрена возможность работы программы, как в ручном режиме, так и в автоматическом (работа с САИ). С этой целью помимо графического интерфейса добавлена возможность запуска приложения с помощью командной строки. Для записи результатов в САИ добавлена возможность создания *.xml файлов с результатами, формат которых соответствует протоколам взаимодействия с данной системой.

Разработанное программное средство получило название «Cyclogram».

Описание работы программы

Вид главного окна графического интерфейса пользователя показан на рисунке 2. Данный интерфейс предоставляет инструменты для задания пути к необходимым файлам и запуска обработки.

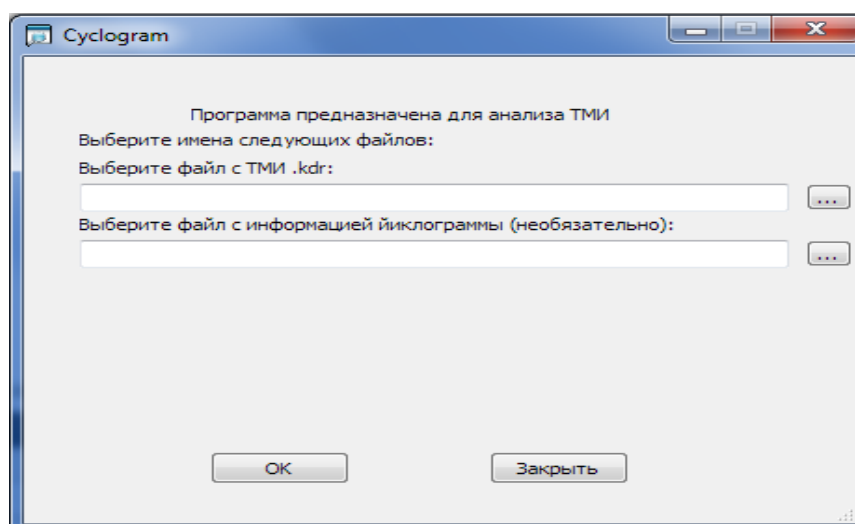


Рис. 2. Графический интерфейс программы

Результатом работы программы при запуске в графическом режиме является информационное сообщение, содержащее основные результаты анализа. Вид данного окна для случая, когда выбранный файл с ТМИ не содержит данных для анализа в части проверки нормативностей времён работы ПМ и значение одного из признаков в ТМИ не нормативно, показан на рисунке.

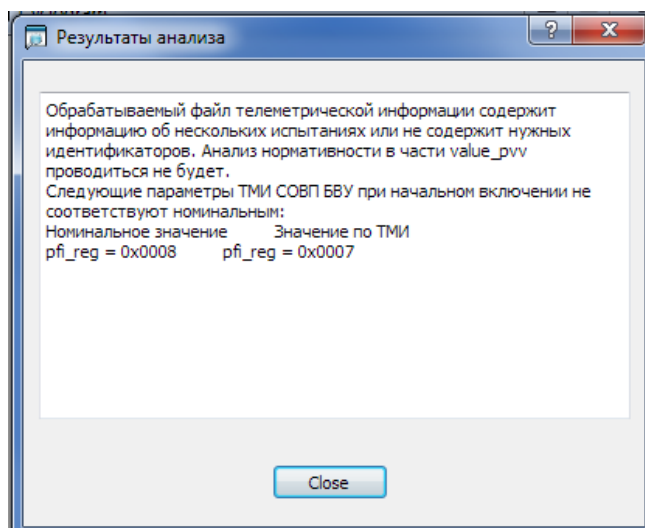


Рис. 3. Результаты анализа в части проверки нормативности отработки режима БВУ

В случае наличия данных для проверки нормативности времён работы ПМ, создаётся файл протокола, примерный вид которого представлен на рисунке.

Протокол представляет собой файл формата ods программы OpenOffice Calc. Выбор формата ods обусловлен тем, что он является свободно распространяемым, а также тем, что существуют методы по его автоматизации, связанные с возможностью работать с файлами данного формата, как с архивами. С целью улучшения восприятия представленной в протоколе информации человеком, строки таблицы окрашены в два чередующихся цвета. Для обеспечения возможности быстрой идентификации тех ПМ, время работы которых не укладывается в

отведённый интервал, соответствующие таким ПМ строки таблицы окрашены в красный цвет.

Number of point	Name of module	First side	Second side	Max value	Actual time of the work of the side	Ending time in CG	Time in CG	Stock	Stock, %
1	SyncBuk_x	1080	470	1080	780.000000	2000	2000	1220	61.000000
2	MkoExRecv	2880	2730	2880	880.000000	3400	1400	520	37.142857
3	MkoSend_zp2	3820	3490	3820	420.000000	4700	1300	880	67.692307
4	disp_skd_x	5500	5480	5500	800.000000	6000	1300	500	38.461540
5	MkoRecv_zp2	6340	6490	6490	490.000000	7250	1250	760	60.799999
6	MkoSend_zp3	8130	7340	8130	880.000000	8600	1350	470	34.814816
7	disp_skd_x	8880	8880	8880	280.000000	9900	1300	1020	78.461540
8	MkoRecv_zp3	10800	10780	10800	900.000000	11500	1600	700	43.750000
9	MkoSend_zp4	12070	11590	12070	570.000000	13000	1500	930	62.000000
10	disp_skd_x	13480	13470	13480	480.000000	14600	1600	1120	70.000000
11	MkoRecv_zp4	15130	15380	15380	780.000000	16400	1800	1020	56.666668
12	disp_skd_x	16980	16980	16980	580.000000	17650	1250	670	53.999998
13	SendPw_x	18230	17750	18230	580.000000	18850	1200	620	51.666668
14	RecvPw_x	18980	19450	19450	600.000000	20100	1250	650	52.000000
15	disp_skd_x	20910	21240	21240	1140.000000	21750	1650	510	30.909090
16	SendPw_x	22000	22000	22000	250.000000	22200	450	200	44.444443
17	RecvPw_x	22630	22630	22630	430.000000	22950	750	320	42.666668
18	disp_skd_x	24290	24290	24290	1340.000000	25000	2050	710	34.634148
19	MkoSend_zp5	25650	25090	25650	650.000000	27000	2000	1350	67.500000
20	disp_skd_x	27120	27120	27120	120.000000	28800	1800	1680	93.333336
21	SendPw_x	28900	28900	28900	100.000000	31000	2200	2100	95.454544
22	MkoRecv_zp5	31670	31930	31930	930.000000	33500	2500	1570	62.799999
23	psl1_ei3_x	33670	33670	33670	170.000000	33900	400	230	57.500000
24	MkoSend_zp6	34620	33990	34620	720.000000	35900	2000	1280	64.000000
25	Empty	0	0	0	0.000000	37400	1500	1500	100.000000
26	disp_skd_x	37680	37680	37680	280.000000	38900	1500	1220	81.333336
27	MkoRecv_zp6	39710	40000	40000	1100.000000	41000	2100	1000	47.619049
28	disp_skd_x	41590	41590	41590	590.000000	42000	1000	410	41.000000
29	SendPw_x	42410	42110	42410	410.000000	42800	800	390	48.750000
30	RecvPw_x	42930	43230	43230	430.000000	43600	800	370	46.250000
31	disp_skd_x	44170	44400	44400	800.000000	44800	1200	400	33.333332
32	SendPw_x	44970	44970	44970	170.000000	45300	500	330	66.000000
33	RecvPw_x	45560	45560	45560	260.000000	45800	500	240	48.000000
34	disp_skd_x	46610	46610	46610	810.000000	49000	3200	2390	74.687500

Рис. 4. Вид протокола анализа отработки циклограммы

На рисунке представлен вид протокола для случая, когда время выполнения ряда ПМ не укладывается в установленные временные рамки. Строки таблицы, соответствующие данным модулям, подсвечены красным.

Number of point	Name of module	First side	Second side	Max value	Actual time of the work of the side	Ending time in CG	Time in CG	Stock	Stock, %
1	SyncBuk_x	1080	470	1080	780.000000	2000	2000	1220	61.000000
2	MkoExRecv	2880	2730	2880	880.000000	3400	1400	520	37.142857
3	MkoSend_zp2	3820	3490	3820	420.000000	4700	1300	880	67.692307
4	disp_skd_x	5500	5480	5500	800.000000	6000	1300	500	38.461540
5	MkoRecv_zp2	6340	6490	6490	490.000000	7250	1250	760	60.799999
6	MkoSend_zp3	8130	7340	8130	880.000000	8600	1350	470	34.814816
7	disp_skd_x	8880	8880	8880	280.000000	9900	1300	1020	78.461540
8	MkoRecv_zp3	10800	10780	10800	900.000000	11500	1600	700	43.750000
9	MkoSend_zp4	12070	11590	12070	570.000000	13000	1500	930	62.000000
10	disp_skd_x	13480	13470	13480	480.000000	14600	1600	1120	70.000000
11	MkoRecv_zp4	15130	15380	15380	780.000000	16400	1800	1020	56.666668
12	disp_skd_x	16980	16980	16980	580.000000	17650	1250	670	53.999998
13	SendPw_x	18230	17750	18230	580.000000	18850	1200	620	51.666668
14	RecvPw_x	18980	19450	19450	600.000000	20100	1250	650	52.000000
15	disp_skd_x	20910	21240	21240	1140.000000	21750	1650	510	30.909090
16	SendPw_x	22000	22000	22000	250.000000	22200	450	200	44.444443
17	RecvPw_x	22630	22630	22630	430.000000	22950	750	320	42.666668
18	disp_skd_x	24290	24290	24290	1340.000000	25000	2050	710	34.634148
19	MkoSend_zp5	25650	25090	25650	650.000000	26800	1800	1150	63.888889
20	disp_skd_x	27120	27120	27120	320.000000	28600	1800	1480	82.222221
21	SendPw_x	28900	28900	28900	300.000000	30800	2200	1900	86.363640
22	MkoRecv_zp5	31670	31930	31930	1130.000000	32000	1200	70	5.833333
23	psl1_ei3_x	33670	33670	33670	1670.000000	32300	300	-1370	-456.666656
24	MkoSend_zp20	34620	33990	34620	2320.000000	32900	600	-1720	-286.666656
25	Empty	0	0	0	0.000000	33500	600	600	100.000000
26	MkoRecv_zp20	37680	37680	37680	4180.000000	34250	750	-3430	-457.333344
27	psl1_ei3_x	39710	40000	40000	5750.000000	34450	200	-5550	-2775.000000
28	MkoSend_zp21	41590	41590	41590	7140.000000	35050	600	-6540	-1090.000000

Рис. 5. Вид протокола анализа отработки циклограммы

(обнаружены замечания)

Выводы

В результате работы предложен новый алгоритм автоматизации анализа работы БВУ в части определения соответствия значений признаков, характеризующих работу вычислителя нормативным, а также нормативности времён работы ПМ. На основе предложенного алгоритма проведено создание программного средства: сформулированы требования и осуществлена реализация. Осуществлено внедрение разработанного приложения в существующую на предприятии систему автоматизации испытаний. В результате существенно упростилась автоматизация анализа работы БВУ при проведении стендовых испытаний.

Следующим этапом в развитии автоматизированного анализа является мониторинг нормативности значений параметров не только для момента начального включения, но и в процессе функционирования БВУ. Кроме того, в настоящий момент анализируется работа только БВУ, однако представляет интерес также анализировать и работу блока управления и контроля (БУК), т.е. того устройства, которое управляет смежными системами (поворот солнечных батарей, подрыв пиропатронов и т.д.) через блоки-спутники. БУК в своём составе также содержит вычислитель, на котором выполняется ПО. Таким образом, возникает задача проводить анализ хода вычислительного процесса и в данном блоке.

Библиографический список

1. Алифанов О.М., Медведев А.А., Соколов В.П. Подходы к созданию и направления применения малых космических аппаратов в космической деятельности // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28039>
2. Гусев А.А., Ильина И.Ю., Усачев О.А. Разработка перспективной космической платформы для космических аппаратов океанографического назначения серии «Метеор» // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49285>
3. Асюшкин В.А., Викуленков В.П., Ишин С.В. Итоги создания и начальных этапов эксплуатации межорбитальных космических буксиров типа «Фрегат» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 3 - 9.
4. Внуков А.А., Рвачева Е.И. Предпосылки и перспективы создания полностью электрореактивных космических аппаратов для работы на геостационарной орбите // Сибирский журнал науки и технологий. 2014. № 4 (56). С. 140 – 146.
5. Матюшин М.М., Луценко Ю.С., Гершман К.Э. Синтез структуры органа управления космических группировок // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72869>
6. Заведеев А.И., Ковалев А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29687>

7. Nancy G. Leveson. Role of software in spacecraft accidents // Journal of spacecraft and Rockets, 2004, vol. 41 (4), pp. 564 – 575.
8. Андреев В.П., Волович Н.В., Глебов В.М. и др. Проектирование и испытания бортовых систем управления. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. – 344 с.
9. Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.
10. Пейсахович Д.Г. Некоторые особенности построения систем передачи телеметрической информации // Молодой ученый. 2010. Т. 1. № 8. С. 109 – 112.
11. T. Peng et al. A Component-Based Middleware for a Reliable Distributed and Reconfigurable Spacecraft Onboard Computer // IEEE 35th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS), Budapest, 2016, pp. 337 – 342. DOI:[10.1109/SRDS.2016.051](https://doi.org/10.1109/SRDS.2016.051)
12. Eickhoff J. Onboard computers, onboard software and satellite operations: an introduction, Springer Science & Business Media, 2011. DOI [10.1007/978-3-642-25170-2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25170-2).
13. Додонов А.Р. Принципы организации бортовых вычислительных комплексов автоматических космических аппаратов // Достижения науки и образования. 2018. № 8 (30). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiipy-organizatsii-bortovyh-vychislitelnyh-kompleksov-avtomaticheskikh-kosmicheskikh-apparatov>
14. Salehi Mohammad et al. Two-state checkpointing for energy-efficient fault tolerance in hard real-time systems // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2016, vol. 24 (7), pp. 2426 – 2437. DOI: [10.1109/TVLSI.2015.2512839](https://doi.org/10.1109/TVLSI.2015.2512839)

15. Xu J. and Parnas D.L. On satisfying timing constraints in hard-real-time systems // IEEE transactions on software engineering, 1993, vol. 19 (1), pp. 70 – 84. DOI: [10.1109/32.210308](https://doi.org/10.1109/32.210308)

16. Табаков Е.В., Зинина А.И., Красавин Е.Э. Автоматизация анализа отработки циклограмм бортовых вычислителей космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115153>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-12)

17. Табаков Е.В., Зинина А.И., Косинский М.Ю., Щелькалин М.Ю. Анализ нормативности отработки циклограмм бортовых вычислителей космических аппаратов с использованием автоматизированных систем // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019» (Москва, 26.ноября 2019): тезисы докладов. – М.: Логотип, 2019. С. 174.

18. Табаков Е.В., Зинина А.И. Автоматизация анализа использования ресурсов бортовых вычислителей космических аппаратов // 11-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики - 2019» (Москва, 19 ноября 2019): тезисы докладов. – М.: Логотип, 2019. С. 127

19. Щелькалин М.Ю. Использование информационных технологий для поддержки разработки бортового программного обеспечения // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70707>

20. Шатский М.А., Щелькалин М.Ю. Система автоматизации испытаний функционального программного обеспечения систем управления космических

аппаратов // II Всероссийская научно-техническая конференция «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (Москва, 26 октября 2012): тезисы докладов. – М.: МОКБ МАРС, 2012.

С. 48.