УДК 629.78.064.5

М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев

Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи

Приводится сравнение последовательного и параллельного регулятора мощности солнечной батареи. Представлен сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи, в том числе с использованием экстремального регулятора мощности. Анализ показал, что энергетические характеристики системы электропитания на базе энергопреобразующей аппаратуры с последовательным регулятором мощности с применением экстремального регулятора мощности солнечной батареи эквивалентны энергетическим характеристикам системы электропитания на базе энергопреобразующей аппаратуры с параллельным регулятором солнечной батареи для применения на геостационарной орбите. Применение экстремального регулятора мощности для последовательного регулятора дает выигрыш по площади солнечной батареи 1 м^2 по уровню выходной мощности 6 кВт при прочих равных условиях.

Ключевые слова: энергопреобразующая аппаратура, последовательный регулятор, параллельный регулятор, экстремальный регулятор мощности, система электропитания космического аппарата.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-98-102

В настоящее время при разработке систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) применяется энергопреобразующая аппаратура (ЭПА) как с параллельным, так и последовательным регулятором мощности солнечной батареи (БС) [1–5].

Выбор типа регулятора мощности БС в энергопреобразующей аппаратуре ЭПА осуществляется по критерию энергетической эффективности [6]. Для оценки энергетической эффективности регулятора БС используется коэффициент передачи мощности БС, который представляет собой отношение мощности, которая передается на выходные шины ЭПА, к входной мощности ЭПА (выходной мощности БС) за вычетом не зависящего от выходной мощности собственного потребления ЭПА.

Результаты оценки энергетической эффективности рассматриваемых типов регуляторов БС предыдущего поколения и принятые на ее основе правила преимущественного применения ЭПА с регулятором параллельного и последовательного типов следующие:

- коэффициент передачи мощности БС параллельного регулятора ($\sim 1,0$) выше, чем последовательного ($\sim 0,92 \div 0,94$);
- параллельный регулятор имеет безусловное преимущество для применения на КА с большой мощностью нагрузки, эксплуатирующийся на геостационарной орбите (ГСО – круговая орбита высотой 36000 км , плоскость орбиты совпадает с плоскостью эклиптики) [7, 8];
- последовательный регулятор следует применять на низкокруговой орбите (НКО – круговая орбита высотой до 1500 км), высокоэллиптической орбите (ВЭО – эллиптическая орбита с высотой апогея около 40000 км и перигея – 500 км) и высококруговой орбите (ВКО – круговая орбита высотой около 20000 км), с переменной освещенностью и, следовательно, с переменной температурой БС, с использо-

ванием экстремального регулятора мощности (ЭРМ) БС, на КА малой и средней мощности, где отводить относительно большие потери ($6\text{--}8\%$) не представляет технических проблем.

Рассмотрим далее эволюцию схем последовательного и параллельного регулятора, применяемых для регулирования мощности БС. На рис. 1 приведена схема параллельного (а) и последовательного (б) регуляторов предыдущего поколения.

Рис. 1. Схемы для регулирования мощности БС предыдущего поколения

На рис. 2 приведена схема параллельного (а) и последовательного (б) регуляторов, применяемых в настоящее время.

Авторами по методике, приведенной в [9], проведено определение коэффициента передачи мощности от солнечной батареи в нагрузку ЭПА различных разработчиков (Thales Alenia Space, АО «ИСС»,

АО «НПЦ «Полус»). Образец ЭПА ИП №1: завершение ОКР в 2012 г., разработчик Thales Alenia Space, номинал выходной шины 100 В (15 кВт), параллельный регулятор мощности БС, ЭРМ отсутствует. Образец ЭПА ОП №2: завершение ОКР в 2013 г., разработчик АО «ИСС», номинал выходных шин 27 В (860 Вт) и 100 В (15 кВт), параллельный регулятор мощности БС, ЭРМ отсутствует. Образец ЭПА ОП №3: завершение ОКР в 2012 г., разработчик АО «ИСС», номинал выходных шин 27 В (860 Вт) и 100 В (5,6 кВт), параллельный регулятор мощности БС, ЭРМ отсутствует. Образец ЭПА ОП №4: завершение ОКР в 2013 г., разработчик АО «НПЦ «Полус», номинал выходных шин 27 В (1200 Вт) и 100 В (4,4 кВт), последовательный регулятор мощности БС, ЭРМ присутствует [10].

Рис. 2. Схемы для регулирования мощности БС текущего поколения

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты передачи мощности регулятора БС				
Прибор	ЭПА ИП №1	ЭПА ОП №2	ЭПА ОП №3	ЭПА ОП №4
КПМ	0,989	0,977	0,993	0,978

Как видно из таблицы, в настоящее время коэффициенты передачи мощности параллельного и последовательного регуляторов (от БС до нагрузки) практически идентичны, что обусловлено следующими основными факторами:

- Изменение схемы параллельного регулятора с введением секционного регулирования мощности БС (добавление в последовательную цепь дросселя и диодной развязки – фактически двух диодов для обеспечения надёжности), что привело к появлению потерь в последовательной цепи.

- Изменение номинала основной выходной шины ЭПА с 27 на 100 В, что привело к снижению относительных статических потерь мощности в последовательном регуляторе.

- Замена силовых биполярных транзисторов на полевые транзисторы, что привело к снижению ста-

тических и динамических потерь в последовательном регуляторе [11].

Таким образом, изменение соотношения энергетической эффективности регуляторов БС последовательного и параллельного типа в сторону паритета обусловлено объективными процессами совершенствования применяемой элементной базы и системными изменениями в части внешних интерфейсов и применяемых схемотехнических решений.

Учитывая результаты оценки коэффициента передачи мощности для рассматриваемых типов регуляторов БС (смещение значений в сторону паритета), для разработки критерия применения того или иного типа регулятора БС в ЭПА следует рассмотреть их эффективность с системной точки зрения, т.е. на уровне СЭП КА. Для этого проведен анализ требуемой площади БС для суммарной выходной мощности нагрузки 5,6 кВт при применении последовательного регулятора с экстремальным регулятором мощности БС и параллельного регулятора.

При проведении сравнительного анализа энергетической эффективности систем электропитания должно быть учтено обстоятельство, существенно влияющее на оценку.

Это обстоятельство возникает из следующих объективных факторов:

- Как параллельный, так и последовательный регулятор мощности БС в режиме отбора всей мощности БС (и без реализации функции экстремального регулирования мощности БС) работает при фиксированном напряжении БС. Это фиксированное напряжение незначительно отличается от номинального напряжения выходной шины на величину падения напряжения в прямой цепи ЭПА. Например, в этом режиме для номинала (100±1) В входное напряжение по шине БС составляет ~102÷103 В.

- Это означает, что оптимальное рабочее напряжение БС в худшем случае не должно быть менее этого значения. Естественно, это значение определяется в том числе и с учетом запасов на падение напряжения в силовых шинах и проектных запасов на неопределённости.

- Худшим расчётным случаем для определения проектного значения оптимального рабочего напряжения БС является конец ресурса и весеннее равенствие (для ГСО). В весеннее равенствие имеется наибольшее значение коэффициента освещённости (~1,03), а, следовательно, и наибольшая рабочая температура. При этом, как известно, с ростом температуры снижается оптимальное рабочее напряжение БС.

- Худшим расчётным случаем для определения проектного значения минимальной площади БС для обеспечения положительного энергобаланса является случай летнего солнцестояния. Это происходит по следующим причинам:

- Требования по необходимой мощности заряда, для компенсации разряда АБ только во время работы плазменного двигателя в период солнцестояния существенно меньше, чем для периода равно-

денствия для компенсации разряда АБ при прохождении теней Земли. Эти значения составляют ~200 и 800–1,200 Вт соответственно, что эквивалентно разнице в требуемой площади БС на ~2–3 м².

– Но эти меньшие требования по мощности БС должны обеспечиваться в существенно худших условиях освещенности. Баллистический коэффициент освещенности составляет 0,885 и 0,989 для летнего солнцестояния и весеннего равноденствия. А это эквивалентно увеличению требуемой площади БС на ~4–5 м².

– То есть, несмотря на то, что в период солнцестояния требуется меньшая мощность БС, чем в период равноденствия, для обеспечения этой меньшей мощности требуется большая площадь БС из-за худшей фактической освещенности в солнцестояние.

Таким образом, объективно возникает ситуация, когда минимальное значение оптимального рабочего напряжения БС определяют условия весеннего равноденствия, а минимальную площадь БС – условия летнего солнцестояния.

А это естественным образом приводит к тому, что в период летнего солнцестояния оптимальное напряжение БС заметно выше требуемого для ЭПА минимального входного напряжения. Это происходит из-за более низкой температуры БС в период летнего солнцестояния, которая соответствует более низкой освещенности.

Иными словами, для условий эксплуатации на ГСО и в период равноденствия, и в период солнцестояния существует избыток фактической мощности БС, относительно минимально необходимой расчетной мощности.

В период равноденствия – из-за избытка площади БС, минимальное значение которой определяется условиями солнцестояния.

В период солнцестояния – из-за избытка напряжения БС в точке максимальной мощности, минимальное значение которого определяется условиями равноденствия.

По результатам анализа параметров БС, выполненных разработчиком, при обеспечении оптимального рабочего напряжения БС в период весеннего равноденствия не менее 105 В, оптимальное рабочее напряжение БС в период летнего солнцестояния составит не менее ~110 В.

Таким образом, для худшего случая, определяющего минимальную площадь БС, БС имеет мощность в оптимальной рабочей точке не менее чем на 4% больше, чем при работе при фиксированном рабочем напряжении. И этот избыток не может быть использован ЭПА без реализации функции экстремального регулирования мощности БС.

Из изложенного выше следует, что реализация функции экстремального регулирования мощности БС должна несколько уменьшить площадь БС, требуемую для обеспечения энергобаланса КА на ГСО [12, 13].

При этом все известные типы ЭПА с последовательным регулятором мощности БС традиционно, на протяжении уже более 30 лет, оснащаются конту-

ром экстремального регулирования мощности БС. Опыт эксплуатации в полёте подтвердил его эффективность и надёжность. Принятые и реализованные в ЭПА с параллельным регулятором решения не имеют возможности обеспечить экстремальное регулирование мощности БС.

Анализ проведён из условия реализации ЭРМ БС только для последовательного регулятора, поскольку энергетические параметры ЭПА с параллельным регулированием и реализованным ЭРМ неизвестны.

Для сравнительного анализа полученных значений КПМ в [14] и собственного потребления ЭПА проведен расчет нулевого суточного (виткового) энергобаланса по тестовой циклограмме потребления на ГСО (теневого участка Земли (ТУЗ) – 1,2 ч в равноденствие, режим коррекции удержания (РКУ) – 3 ч ежесуточно) [15]. Исходные данные по мощности потребления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные по мощности потребления		
ЭПА, кВт	ЭПА ОП №3	ЭПА ОП №4
Выходная мощность по шине 100 В	5	
Дополнительное потребление в РКУ	1,5	
Выходная мощность по шине 27 В	0,6	

Расчет параметров БС и АБ проводится для летнего солнцестояния и весеннего равноденствия. В расчете учитываются падения напряжения в кабелях БС – ЭПА (КПМ БКС 0,97) и АБ – ЭПА (КПМ БКС 0,99), а также энергетический коэффициент АБ по циклу заряд-разряд (0,87).

В табл. 3 приведены результаты расчета для летнего солнцестояния.

Таблица 3

Результаты расчета для летнего солнцестояния					
ЭПА	$P_{БС}$	$S_{БС}, м^2$	$E_{ЗАР}$	$E_{РАЗ}$	$P_{ЭПА}$
ЭПА ОП №3	6,23	28,2	4,55	3,96	230
ЭПА ОП №4 без ЭРМ	6,24	28,2	4,54	3,95	240
ЭПА ОП №4 с ЭРМ	6,24	27,1	4,54	3,95	240

В таблице обозначено:

$P_{БС}$ – минимально необходимая мощность БС для обеспечения нулевого виткового (суточного) энергобаланса [кВт];

$S_{БС}$ – площадь БС, соответствующая минимально необходимой мощности БС [м²];

$E_{ЗАР}$ – витковая зарядная энергия АБ [кВт×ч];

$E_{РАЗ}$ – витковая разрядная энергия АБ [кВт×ч];

$P_{ЭПА}$ – средняя мощность тепловыделения ЭПА за виток (потери) [Вт].

В табл. 4 приведены результаты расчета для весеннего равноденствия.

В таблице обозначено: $E_{РАЗ, ТУЗ}$ – разрядная энергия АБ при прохождении ТУЗ, кВт×ч; $E_{РАЗ, РКУ}$ – разрядная энергия АБ при проведении РКУ, кВт×ч.

Таблица 4

Результаты расчета для весеннего равноденствия

ЭПА	$P_{БС}$	$S_{БС}, м^2$	$E_{ЗАР}$	$E_{РАЗ_ТУЗ}$	$E_{РАЗ_РКУ}$	$E_{РАЗ}$	$P_{ЭПА}$
ЭПА ОП №3	6,64	26,8	11,45	7,21	2,75	9,97	255
ЭПА ОП №4	6,64	26,8	11,34	7,08	2,79	9,87	260

В табл. 5 приведены значения мощности БС и требуемая энергоёмкость комплекта АБ с 5%-ным запасом для обеспечения положительного виткового энергобаланса как в весеннее равноденствие, так и в летнее солнцестояние.

Таблица 5

Параметры для обеспечения положительного энергобаланса

ЭПА	$P_{БС}, кВт$	$S_{БС}, м^2$	$E_{АБ}, кВт \times ч$
ЭПА ОП №3	7,40	29,6	7,60
ЭПА ОП №4 без ЭРМ	7,45	29,8	7,45
ЭПА ОП №4 с ЭРМ	7,15	28,6	7,45

То есть площадь БС, минимально необходимая для обеспечения положительного энергобаланса во все сезоны, для данного расчётного случая (при использовании ЭРМ БС) уменьшается на $\sim 1 м^2$ ($\sim 4\%$).

В результате оценки энергетической эффективности ЭПА с регулятором БС последовательного и параллельного типа показано следующее:

1. За счёт применения ЭРМ БС в ЭПА с последовательным регулятором БС энергетические характеристики СЭП на её базе как минимум не хуже, чем энергетические характеристики СЭП на базе ЭПА с параллельным регулятором БС. Кроме того, эти типы ЭПА как минимум эквивалентны для применения на мощных КА на ГСО, а как максимум за счёт применения ЭПА с последовательным регулятором мощности БС и ЭРМ достигается выигрыш по требуемой площади БС.

2. Уровень предпочтительности применения ЭПА с последовательным регулятором и ЭРМ БС в СЭП КА на НКО, ВЭО и ВКО с широким диапазоном уровней освещённости/температуры БС, а также с существенной неопределённостью радиационной деградации – ещё более упрочился.

Таким образом, поскольку по критерию энергетической эффективности СЭП на базе ЭПА с обоими типами регуляторов практически эквивалентны, выбор типа регулятора БС в ЭПА при разработке КА следует осуществлять по второму критерию – удельной мощности ЭПА [Вт/кг]. Далее должны учитываться критерии второго порядка – отработанность схемотехнических решений, степень наземной и летной квалификации оборудования и т.д.

Литература

1. Patel M.R. Spacecraft power systems. – New York: CRC Press, 2005. – 734 p.
2. Ley W. Handbook of Space Technology / W. Ley, K. Wittmann, W. Hallmann. – New York: Wiley & Sons, 2009. – 906 p.
3. Аникин А.С. Электропитание космических аппаратов: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2014. – 177 с.

4. Чеботарев В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / В.Е. Чеботарев, В.Е. Косенко. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2011. – С. 334–340.

5. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 152–155.

6. Соустин Б.П. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев // Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская изд. фирма, 1994. – 318 с.

7. Кудряшов В.С. Концепция бортовой системы электроснабжения связного геостационарного ИСЗ / В.С. Кудряшов, Ш.Н. Ислаев // Системы электроснабжения и электромеханические устройства. – Т. 1: Аппаратура управления и преобразования: сб. науч. трудов НПО «Полус». – Томск, 1992. – С. 17–24.

8. O'Sullivan D. The Sequential Switching Shunt Regulator S3R / D. O'Sullivan, A. Weunberg // Proc. Of the 3rd ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar. Noordwijk, Netherlands. – 1977. – P. 123–131.

9. Нестеришин М.В. Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов / М.В. Нестеришин, В.Г. Букреев, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 112–118.

10. Козлов Р.В. Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с последовательным и параллельным регулятором мощности БС / Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Томск, 12–13 апреля 2018 г.), АО «НПП «Полус». – Томск, 2018. – С. 6–9.

11. Erickson R.W. Fundamentals of power electronics / R.W. Erickson, D. Maksimovic. New York: Kluwer Academic. – Plenum Publishers, 2001. – 881 p.

12. Femina N. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems / N. Femina, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. – London: CRC Press, 2013. – 355 p.

13. Hyder A.K. Spacecraft Power Technologies. – London: Imperial College Press/World Scientific Publishing, 2003. – 492 p.

14. Нестеришин М.В. Методика определения энергетических параметров энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космических аппаратов / М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Решетневские чтения: матер. XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем акад. М.Ф. Решетнева (08–11 нояб., г. Красноярск): в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2017. – Ч. 1. – С. 302–303.

15. Macdonald M. The International Handbook of Space Technology / M. Macdonald, V. Badescu. – Berlin: Springer-Verlag, 2014. – 728 p.

Нестеришин Михаил Владленович

Начальник отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железногорск, Россия, 692972
Тел.: +7 (391-9) 76-41-57
Эл. почта: Micky_nest@iss-reshetnev.ru

Козлов Роман Викторович

Начальник группы отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железнодорожный, Россия, 692972
Тел.: +7 (391-9) 76-41-57
Эл. почта: krv@iss-reshetnev.ru

Журавлев Александр Викторович

Инженер-конструктор отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
Ленина ул., д. 52, г. Железнодорожный, Россия, 692972
Тел.: +7 (391-9) 76-41-57
Эл. почта: zhuravlev@iss-reshetnev.ru

Nesterishin M.V., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V.

Comparative analysis of energy efficiency of power conditioning units with parallel and serial Solar Array power regulators

This article describes comparison of parallel and serial Solar Array power regulators. It presents the comparative analysis of the energy efficiency of the power conditioning units with parallel and serial Solar Array power regulators, including the max power point tracker usage. The analysis showed that the energy characteristics of the power supply system based on energy conversion equipment with a serial power regulator using an extreme solar battery power regulator are equivalent to the energy characteristics of the power supply system based on energy conversion equipment with a parallel solar battery regulator for geo-stationary orbit. Usage of the max power point tracker with the serial regulator gives gain by 1 m² of Solar Array square at output power level of 6 kW in other equal conditions.

Keywords: power conditioning units, serial regulator, parallel regulator, max power point tracker, spacecraft electric power system.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-98-102

References

1. Patel M.R. *Spacecraft power systems*. New York, CRC Press, 2005, 734 p.
2. Ley W., Wittmann K., Hallmann W. *Handbook of Space Technology*. New York, Wiley & Sons, 2009, 906 p.
3. Anikin A.S. *Elektropitanie kosmicheskikh apparatov: ucheb. posobie*. Tomsk, TUSUR, 2014, 177 p.
4. Chebotarev V.E., Kosenko V.E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informacionnogo obespecheniya: ucheb. posobie*. Krasnoyarsk, Sib. gos. aërokosmich. un-t, 2011, pp. 334–340.
5. Shinyakov YU.A. Energeticheskij analiz strukturnykh skhem sistem ehlektrosnabzheniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 309, № 8, pp. 152–155.
6. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev SH.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov*. Novosibirsk, VO Nauka., Sibirskaya izd. Firma, 1994, 318 p.
7. Kudryashov V.S., Islyayev SH.N. *Koncepciya bortovoj sistemy elektrosnabzheniya svyaznogo geostacionarnogo ISZ. Sistemy elektrosnabzheniya i elektromekhanicheskie ustrojstva*. vol.1. Apparatura upravleniya i preobrazovaniya. Tomsk, Sb. nauch. trudov NPO Polyus, 1992, pp. 17–24.
8. O'Sullivan D., Weunberg A. The Sequential Switching Shunt Regulator S3R. *Proc. Of the 3rd ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar*. Netherlands. Noordwijk, 1977, pp. 123–131.
9. Nesterishin M.V., Bukreev V.G., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. Metodika ocenki energeticheskoy effektivnosti energopreobrazuyushchej apparatury kosmicheskikh apparatov. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, № 1, pp. 112–118.
10. Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. Sravnitel'nyj analiz energeticheskoy effektivnosti energopreobrazuyushchej apparatury s posledovatel'nym i parallel'nym regulyatorom moshchnosti BS. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustrojstva*. Tomsk, AO NPC Polyus, 2018, pp. 6–9.
11. Erickson R.W., Maksimovic D. *Fundamentals of power electronics*. New York, Kluwer Academic. Plenum Publishers, 2001, 881 p.
12. Femina N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M. *Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems*. London, CRC Press, 2013, 355 p.
13. Hyder A.K. *Spacecraft Power Technologies*. London, Imperial College Press. World Scientific Publishing, 2003, 492 p.
14. Nesterishin M.V., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. Metodika opredeleniya energeticheskikh parametrov energopreobrazuyushchej apparatury sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov. *Reshetnevskie chteniya: mater. XXI Mezhdunar. nauch-prakt. konf., posvyashch. pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva*. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva, 2017, vol. 1, pp. 302–303.
15. Macdonald M., Badescu V. *The International Handbook of Space Technology*. Berlin, Springer-Verlag, 2014, 728 p.

Mikhail V. Nesterishin

Head of Spacecraft On-board Power Systems Division, Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems»
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972
Phone: +7 (391-9) 76-41-57
Email: Micky_nest@iss-reshetnev.ru

Roman V. Kozlov

Head of Spacecraft On-board Power Systems Division, Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems»
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972
Phone: +7 (391-9) 76-41-57
Email: krv@iss-reshetnev.ru

Alexander V. Zhuravlev

Engineer-designer, Spacecraft On-board Power Systems Division, Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev «Information Satellite Systems»
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972
Phone: +7 (391-9) 76-41-57
Email: zhuravlev@iss-reshetnev.ru