УДК 629.783:064.5

П.В. Киселев, В.Г. Букреев, В.А. Гебгардт

Моделирование передачи помехи от воздействия электростатического разряда через кабельную сеть космического аппарата

Целью проведенного исследования являлось уточнение модели кабельной сети, связывающей солнечную батарею с энергопреобразующей аппаратурой космического аппарата, в части передачи возмущающего воздействия от электростатического разряда. Произведена попытка рассмотрения кабельной сети в виде длинной линии. Проведено сравнение полученных результатов моделирования с результатами испытаний кабелей. Сформированы предложения по дальнейшему уточнению модели для возможности ее использования при изучении воздействия электростатического разряда на энергопреобразующую аппаратуру и бортовую аппаратуру космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, система электропитания, электростатический разряд, кабельная сеть, линия с распределенными параметрами.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-103-107

Взаимодействие заряженных частиц и солнечного излучения с элементами космического аппарата (КА) приводит к накоплению на их поверхности электрического заряда и обусловленного им электрического потенциала относительно окружающей плазмы. Даже в случае квазинейтральной плазмы, у которой концентрация электронов и ионов примерно одинакова, вследствие того, что скорость электронов намного больше скорости ионов, всегда создаются условия для электризации поверхности. Этим объясняется наличие на поверхности КА преимущественно отрицательного потенциала.

Разные участки поверхности КА могут заряжаться неодинаково из-за различных условий воздействия внешних факторов и из-за различий в электрофизических свойствах находящихся на них материалов. Происходит так называемый дифференциальный заряд, при котором между отдельными участками поверхности КА появляются электрические напряжения. В некоторых случаях возникающие на КА потенциалы могут измеряться киловольтами и могут приводить к электрическим разрядам на поверхности КА и солнечной батареи (СБ) [1–3].

Проведенный путем моделирования расчет переходных процессов токов и напряжений, возникающих в системе электропитания от возмущающего воздействия электростатического разряда на СБ, показал, что на вход шунтового стабилизатора (ШС) энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) через кабельную сеть проходит воздействие размахом до 2080 В (от –1880 до +200 В). Наибольшую часть воздействия на вход ЭПА принимают на себя входные диоды ШС ЭПА. Напряжение на входных диодах достигает 500 В в обратном направлении, что может привести к пробое диода [4].

Таким образом, возникло несоответствие, поскольку, с одной стороны, результаты моделирования показывают превышение допустимых параметров на элементах электрической схемы, но, с другой стороны, неизвестно об их сбоях и деградации по

причине воздействия электростатического разряда (ЭСР) в полете. Авторы высказывают предположение о том, что данное несоответствие может быть вызвано, во-первых, недостаточной точностью моделирования СЭП. Во-вторых, параметры ЭСР на поверхности СБ, приведенные в ГОСТ [5], могут быть существенно завышены. Так, в некоторых публикациях приведены другие параметры ЭСР, например в работах [6, 7].

Изучение данного несоответствия предлагается начать с уточнения модели такого важного элемента СЭП, как кабельная сеть, связывающая СБ и ЭПА.

Структура модели кабельной сети

Значительная часть воздействия от ЭСР, возникающего между диэлектрическими поверхностями защитных стекол СБ и токопроводящими элементами КА или магнитосферной плазмой, поступает на элементы ЭПА через кабельную сеть. По этой причине предлагается в первую очередь выполнить уточнение модели кабельной сети.

Блок-схема системы электропитания КА (рассматривается одна секция СБ) показана на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема системы электропитания КА (с одной секцией СБ): Кл – клемма заземления; КС – кабельная сеть; Н – нагрузка; Осн.ШС – основной канал ШС; Рез.ШС – резервный канал ШС; СБ1 – секция СБ

Силовые провода, по которым передается электрическая мощность от рассматриваемой секции СБ до ЭПА, входят в состав трех последовательно соединенных кабелей. Измеренная общая длина ка-

бельной линии как по плюсовой, так и по минусовой шинам составляет 18,1 м.

Кабельную сеть следует рассматривать как линию с распределенными параметрами, когда фаза сигнала за время распространения по ней меняется на 90° и более электрических градусов [8, 9]. Таким образом, в нашем случае длина λ волны должна быть не более $18,1 \cdot 90^\circ / 360^\circ = 4,525$ м, что даже в свободном пространстве соответствует частоте распространения ($f = c/\lambda$) не менее 66,3 МГц [10], где c – скорость света в вакууме.

Так как длительность импульса ЭСР может принимать значения от сотен наносекунд до единиц микросекунд, а длительность фронта – от 1 до 100 нс, то при разложении импульса в ряд Фурье ему будут соответствовать частоты основных гармоник (амплитудой не менее 1% по отношению к амплитуде ЭСР) в диапазоне от 5,2 МГц до 1,1 ГГц [4]. Поэтому кабельная сеть является длинной линией и для уточнения модели необходимо определить её погонные значения активного сопротивления, индуктивности, емкости и проводимости – R_1 , L_1 , C_1 и G_1 соответственно.

Конфигурация проводов в трех кабелях, составляющих кабельную сборку, различная. Два кабеля имеют конфигурацию по 4 пары проводов сечением 0,2 и 0,32 мм² по шине «плюс» и шине «минус», один кабель – по 5 проводов сечением 0,5 мм² по шине «плюс» и шине «минус». Все провода МС 26-15 ТУ 16.К76-160-2000 [11] с жилами из медной посеребренной проволоки «БМС» или «МСр». Поэтому целесообразно было расчет волновых параметров производить для каждого кабеля отдельно.

Исходными данными для расчета параметров являлись осциллограммы тока и напряжения на входе кабелей, снятые при подаче синусоидального напряжения на вход кабелей и при холостом ходе (ХХ) и коротком замыкании (КЗ) на выходе кабелей. По полученным осциллограммам были определены комплексные сопротивления Z_{XX} и Z_{K3} .

Произведенный расчет показан в формулах (1)–(9) [10]:

$$Z_B = \sqrt{Z_{XX} \cdot Z_{K3}}, \quad (1)$$

$$\operatorname{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}}) = \sqrt{Z_{K3}/Z_{XX}}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot l_{\text{каб}}} \cdot \ln \left(\frac{1 + \operatorname{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})}{1 - \operatorname{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})} \right), \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot l_{\text{каб}}} \cdot \left[\arg \left(\frac{1 + \operatorname{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})}{1 - \operatorname{th}(\gamma \cdot l_{\text{каб}})} \right) + 2\pi \cdot n \right], \quad (4)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (5)$$

$$R_l = \operatorname{Re}(\gamma \cdot Z_B), \quad (6)$$

$$L_l = \operatorname{Im}(\gamma \cdot Z_B) / \omega, \quad (7)$$

$$G_l = \operatorname{Re}(\gamma / Z_B), \quad (8)$$

$$C_l = \operatorname{Im}(\gamma / Z_B) / \omega. \quad (9)$$

Рассчитанные таким способом параметры R_1 , L_1 , C_1 , G_1 являются элементами схемы участка цепи, показанной на рис. 2.

Рис. 2. Схема участка цепи

Но такой структуры недостаточно для получения адекватной модели кабельной сети.

Во-первых, для определения влияния ЭСР на элементы электрической схемы СЭП и расчета переходных процессов, занимающих время от сотен наносекунд до единиц микросекунд, необходимо привести модель к симметричному виду как по плюсу и минусу, так и по входу и выходу.

Во-вторых, кабельная сеть представляет собой жгут проводов, в котором близко друг с другом расположены как провода плюсовой, так и минусовой цепей. Если амплитуда и фаза токов, протекающих в противоположных направлениях по плюсовым и минусовым проводам, равны, то магнитные поля компенсируются. В противном случае в близкорасположенном проводе начинает возникать ЭДС [12]. Данная связь может оказать существенное влияние на переходные процессы.

ЭСР в точке воздействия вызывает нескомпенсированный отрицательный заряд. Возникают разность потенциалов до 20 кВ и сильное электрическое поле [5]. Отрицательный заряд начинает растекаться по всем токопроводящим элементам в направлении более высоких потенциалов. Поэтому при ЭСР в токопроводящие элементы КА, гальванически связанные к корпусом КА через магнитосферную плазму (рис. 3), токи плюсовой и минусовой шин кабельной сети будут неодинаковыми.

Рис. 3. Точка воздействия ЭСР: Кл – клемма заземления; КА – кабельная сеть; Н – нагрузка; Оси.ШС – основной канал ШС; Рез.ШС – резервный канал ШС; СБ1 – секция Б; ЭСР – точка воздействия ЭСР

По этой причине в структуру, показанную на рис. 2, была введена магнитная связь между плюсовой и минусовой шинами кабельной линии. Исходные данные для расчета коэффициента магнитной связи для каждого кабеля были определены экспериментально в соответствии со схемой, показанной на рис. 4.

Рис. 4. Схема измерения параметров для расчета магнитной связи

Величина коэффициента магнитной связи k была определена по формулам (10) и (11):

$$M = U_2 / (\omega \cdot I_1), \quad (10)$$

$$k = \frac{M}{l_{\text{каб}} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{2} \cdot \frac{L_1}{2}}} = \frac{2 \cdot M}{l_{\text{каб}} \cdot L_1}, \quad (11)$$

где M – магнитная связь между индуктивностями плюсовой и минусовой шины кабеля; U_2 – действующее значение напряжения между входом и выходом минусовой цепи; ω – угловая частота источника напряжения; I_1 – действующее значение тока в плюсовой цепи при подключении к ее входу и выходу источника синусоидального напряжения; $l_{\text{каб}}$ – длина кабеля; L_1 – погонное значение индуктивности кабеля.

Значение коэффициента магнитной связи для разных кабелей ожидаемо оказалось высоким и составило от 0,85 до 0,9.

Использованная при расчетах схема замещения линии с распределенными параметрами показана на рис. 5.

Рис. 5. Использованная при расчетах схема замещения линии с распределенными параметрами

Сравнение результатов моделирования и испытаний

Приведем результаты моделирования и сравним их с результатами испытаний (рис. 6 и 7).

Пунктирные линии – экспериментальные данные;
сплошные линии – данные моделирования;
тонкие линии – напряжение; жирные линии – ток

Рис. 6. Результаты моделирования передачи синусоидального напряжения и тока по кабелю длиной 10,23 м с конфигурацией по 4 пары проводов сечением 0,2 и 0,32 мм² по шине «плюс» и шине «минус» на частоте 2,621 МГц.

Разбивка на 100 одинаковых участков:
 a – при ХХ на выходе кабеля; b – при КЗ на выходе кабеля

Пунктирные линии – экспериментальные данные;
сплошные линии – данные моделирования;
тонкие линии – напряжение; жирные линии – ток

Рис. 7. Результаты моделирования передачи синусоидального напряжения и тока по кабелю длиной 5,62 м с конфигурацией по 5 проводов сечением 0,5 мм² по шине «плюс» и шине «минус» на частоте 2,629 МГц. Разбивка на 60 одинаковых участков: a – при ХХ на выходе кабеля; b – при КЗ на выходе кабеля

Модель кабельной линии, состоящей из участков длиной около 10 см, позволяет достаточно точно описать объект исследования при определении амплитуды и фазы переменного напряжения и тока относительно поданного на вход напряжения. При

сравнении результатов моделирования с аппроксимированными синусоидой результатами испытаний (при исключении высокочастотных помех) для кабельной линии длиной 10,23 м абсолютная ошибка по значению входного тока в режиме XX и КЗ составляет не более 5,2 и 9,9 мА соответственно при амплитуде тока 54,4 и 58 мА соответственно (см. рис. 6). Для кабельной линии длиной 5,62 м абсолютная ошибка по значению входного тока в режиме XX и КЗ составляет не более 10,6 и 6,5 мА соответственно при амплитуде тока 59 и 54,4 мА соответственно (см. рис. 7).

В то же время уменьшение длины участков до 1 см, с одной стороны, не приводит к значительному повышению точности моделирования, но с другой стороны, значительно увеличивает сложность и длительность вычислений. По этой причине на данном этапе исследований целесообразно остановиться на участках длиной 10 см с возможностью пересмотра данного значения при проведении верификации модели СЭП.

Следует отметить, что модель с определенными значениями R_1 , L_1 , C_1 , G_1 и с приведенными уточнениями структуры будет с высокой точностью описывать объект только в частном случае: при той частоте, при которой были получены исходные данные для расчета.

Одним из факторов этого является то, что на частотах выше единиц мегагерц из-за скин-эффекта и эффекта близости токи и магнитные поля распределены по сечению проводников неоднородно [13–15]. По этой причине R_1 и L_1 будут иметь зависимость от частоты источника напряжения, которую необходимо определить.

Выводы и рекомендации

Разработанная модель имеет высокую точность в части описывания кабельной сети в части амплитуды и фазы переменного тока относительно поданного на вход кабелей напряжения. Но это справедливо только при моделировании на частоте, при которой были получены исходные данные для расчета параметров модели. Поскольку цель разрабатываемой модели СЭП – исследование передачи воздействия от ЭСР, которому соответствуют гармоники от единиц мегагерц до единиц гигагерц, модель кабельной сети нуждается в доработке.

Следующим шагом по уточнению модели должен быть расчет сопротивления и индуктивности биметаллических проводов, из которых сделаны кабели, на основе распределения плотности тока по сечению. Наиболее целесообразным вариантом представляется провести расчет при разных частотах источника напряжения и сформировать зависимости $R_1(\omega)$ и $L_1(\omega)$.

Литература

1. Акишин А.И. Электризация космических аппаратов / А.И. Акишин, Л.С. Новиков. – М.: Знание, 1985. – 64 с.
2. Модель космоса: в 2 т. / под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.
3. Акишин А.И. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов / А.И. Акишин,

Л.С. Новиков // Новое в жизни, науке, технике. Сер.: Космонавтика, астрономия. – М.: Знание, 1983. – № 4. – 64 с.

4. Киселев П.В. Моделирование работы электрической схемы системы электропитания космического аппарата для расчета переходных процессов токов и напряжений при воздействии электростатического разряда // Электронные и электромеханические системы и устройства: XIX науч.-техн. конф. (Томск, 16–17 апр. 2015 г.), АО «НПП «Полус». – 2015. – С. 255–257.

5. ГОСТ Р 56515–2015. Аппараты космические автоматические и системы бортовые служебные космических аппаратов. Общие требования по защищенности и стойкости к воздействию электрофизических факторов космического пространства и статического электричества. – Введ. 2015-07-08. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.

6. Inguibert V. Flashover measurement on a solar array – re-adults of EMAGS3 experimental campaign / V. Inguibert, P. Sarraillh, D. Sarraill, C. Baur, D. Payan, A. Gerhard, B. Boulanger, P. Pelissou, C. Wuersching // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 12. – P. 3370–3379.

7. Ferguson D.C. Flashover Current Pulse Formation and the Perimeter Theory / D.C. Ferguson, V. B. Vayner. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 12. – P. 3393–3401.

8. Kuphaldt T.R. Lessons In Electric Circuits. Vol. 2. AC: study guide. – 2007. – 556 p. – Режим доступа: <http://bookfi.net/dl/616896/e7ee66>, свободный (дата обращения: 01.04.2020).

9. Теория длинных линий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.radiouniverse.ru/book/lyubitelskie-antenny-korotkih-i-ultrakorotkih-voln/teoriya-dlinnyh-linij>, свободный (дата обращения: 01.04.2020).

10. Черкашин М.В. Линии передачи и согласующие цепи для СВЧ МИС. Модуль 5. Проектирование и моделирование СВЧ МИС, а также технологических процессов их производства: учеб. пособие / М.В. Черкашин, Л.И. Бабак. – Томск: ТУСУР, 2010. – 54 с.

11. Провода монтажные с полиимидной изоляцией марок МС 26-15, МСЭ 26-15, МСЭО 26-15. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://optochip.org/vniikp/4/1/2/TU16.K76-160-2000>, свободный (дата обращения: 01.04.2020).

12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 11-е изд. – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.

13. Бакалов В.П. Основы теории цепей: учеб. пособие / В.П. Бакалов, Б.И. Дмитриков, Б.И. Крук. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 597 с.

14. Власов А.А. Макроскопическая электродинамика: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2005. – 240 с.

15. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Расчет индуктивности многопроводных кабельных жил в программной среде ELCUT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ruscable.ru/article/Raschyot_induktivnosti_mnogoprovodnykh_kabelnykh_zhil_v_programmnoy_srede_ELCUT, свободный (дата обращения: 01.04.2020).

Киселев Павел Валерьевич

Инженер-конструктор АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева, аспирант инженерной школы энергетики (ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина ул., д. 52, г. Железногорск Красноярского края, Россия, 662972
Тел.: +7-923-332-80-52
Эл. почта: kiselev.home@yandex.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор ИШЭ НИ ТПУ
Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-854-21-96
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Гебгардт Виктор Александрович

Инженер-конструктор АО «Информационные
спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева,
Ленина ул., д.52, г. Железногорск Красноярского края,
Россия, 662972
Тел.: +7-923-401-51-45
Эл. почта: gebgardt33@mail.ru

Kiselev P.V., Bukreev V.G., Gebgardt V.A.

Modeling of electrostatic discharge impact transmitting through spacecraft cabling

The aim of this research was to detail the cabling model from solar array to electrical power convert equipment of the spacecraft in terms of electrostatic discharge impact transmitting. Detailed cabling model is the part of power-supply system model that will be used for electrostatic discharge impact on spacecraft on-board equipment analysis.

Keywords: Spacecraft, power-supply system, electrostatic discharge, cabling, distributed parameter line
doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-103-107

References

1. Akishin A.I., Novikov L.S.: *Elektrizatsiya kosmicheskikh apparatov* [Electrification of spacecrafts]. Moscow, Znaniye Publ., 1985. 64 p. (In Russ.).
2. Panasyuk M.I., Novikov L.S.: *Model kosmosa* [The Space Model]. In 2 vol. Ed. M.I. Panasyuk, L.S. Novikov. Vol. 2. [The impact of the space environment on materials and equipment of spacecraft]. Moscow, KDU Publ., 2007. 1144 p. (In Russ.).
3. Akishin A.I., Novikov L.S.: *Vozdeystviye okruzhayushchey sredy na materialy kosmicheskikh apparatov* [The environmental impact on the materials of spacecraft]. Moscow, Znaniye Publ., 1983. 64 p. (In Russ.).
4. Kiselev P.V.: *Modelirovaniye raboty elektricheskoy skhemy sistemy elektropitaniya kosmicheskogo apparata dlya rascheta perekhodnykh protsessov tokov i napryazheniy pri vozdeystvii elektrosticheskogo razryada* [The spacecraft power supply system characteristics modeling under the electrostatic discharges for currents and voltages transients calculating]. Elektronniye i elektromekhanicheskiye sistemy i ustroystva: XIX nauchno-tehnicheskaya konferentsiya [Electronic and electromechanical systems and devices: XIX scientific-tech. conf.]. Tomsk, JSC Scientific and Production Center Polyus Publ., 2015. 360 p. (In Russ.).
5. GOST R 56515-2015: *Apparaty kosmicheskoye avtomaticheskoye i sistemy bortovoye sluzhebniye kosmicheskikh apparatov. Obshchiye trebovaniya po zashchishchennosti i stoykosti k vozdeystviyu elektrophizicheskikh faktorov kosmicheskogo prostranstva i staticheskogo elektricheskogo* [Automatic spacecrafts and spacecraft platform onboard systems. General requirements for protection and resistance to the outer space and static electricity electrophysical effects]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 20 p. (In Russ.).
6. Inguibert V., Sarraillh P., Sarraillh D., Baur C., Payan D., Gerhard A., Boulanger B., Pelissou P., Wuerschling C. Flashover measurement on a solar array – re-adults of EMAGS3 experimental campaign. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, vol. 41, no. 12, pp. 3370–3379.
7. Dale C. Ferguson, Boris V. Vayner. Flashover Current Pulse Formation and the Perimeter Theory. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, vol. 41, no. 12, pp. 3393–3401.
8. Kuphaldt T.R. Lessons In Electric Circuits. Volume 2. AC: study guide, 2007. 556 p. Available at: <http://bookfi.net/dl/616896/e7ee66> (Accessed: April 1, 2020).
9. *Teoriya dlennikh liniy* [Long line theory]. Available at: <http://bookfi.net/dl/616896/e7ee66> (Accessed: April 1, 2020).
10. Cherkashin M.V., Babak L.I.: *Linii peredachi i soglasuyushch iye tsepi dlya SVCh MIS. Modul 5. Proyektirovaniye i modelirovaniye SVCh MIS, a tagzhe tekhnologicheskikh protsessov ih proizvodstva* [Transmission lines and matching circuits for microwave MIS. Module 5. Design and simulation of microwave MIS, and technological processes for their production]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2010. 54 p. (In Russ.).
11. *Provoda montazhniye s poliimidnoy izolyatsiyey marok MS 26-15, MSE 26-15, MSEO 26-15. Tekhnicheskoye usloviye* [MS 26-15, MSE 26-15, MSEO 26-15 assembly wire models with polyimide insulation. Specification] Available at: <https://optochip.org/vniikp/4/1/2/TY16.K76-160-2000> (Accessed: April 1, 2020) (In Russ.).
12. Bessonov L.A.: *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektricheskoye tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Gardariki Publ., 2007. 701 p. (In Russ.).
13. Bakalov V.P., Dmitriyev B.I., Kruk B.I.: *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Goryachaya liniya – Telecom Publ., 2007. 597 p. (In Russ.).
14. Vlasov A.A.: *Macroscopicaya elektrodinamika* [Macroscopic electrodynamics]. Moscow, FIZMAT-LIT Publ., 2005. 240 p. (In Russ.).
15. Vishnyakov E.M., Khvostov D.V.: *Rashchet induktivnosti mnogoprovolochnykh kabelnykh zhil v programmy srede ELCUT* [Multi-wire cable cores inductance calculation in the ELCUT software environment]. Available at: https://www.ruscable.ru/article/Raschyot_induktivnosti_mnogoprovolochnykh_kabelnykh/ (Accessed: April 1, 2020).

Pavel V. Kiselev

Engineer-designer of Academician M.F. Reshetnev
Information Satellite Systems, Postgraduate student,
Engineering School of Energy, National Research
Tomsk Polytechnic University (NI TPU)
52, Lenin pr., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg.,
Russia, 662972
Phone: +7-923-332-80-52
Email: kiselev.home@yandex.ru

Victor G. Bukreev

Doctor of Engineering Sciences, Professor NI TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-854-21-96
Email: bukreev@tpu.ru

Viktor A. Gebgardt

Engineer-designer of Academician M.F. Reshetnev
Information Satellite Systems
52, Lenin st., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk reg.,
Russia, 662972
Phone: +7-923-401-51-45
Email: gebgardt33@mail.ru