

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ ДЛЯ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. О. Шестаков^{✉1}, А. М. Бутин¹, Ю. С. Ломаев²

¹АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнёва»

г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнёва

г. Красноярск, Российская Федерация

С помощью спутников, созданных в АО «РЕШЕТНЁВ», обеспечивается широкий спектр услуг как в России, так и далеко за ее пределами. При создании космического аппарата большую роль уделяют кабельной сети космического аппарата. Автоматизация процессов разработки конструкторской документации является одним из основных направлений деятельности подразделения систем проектирования и автоматизации разработки кабельных сетей. Автоматизированные системы проектирования внедряются для повышения эффективности выпуска конструкторской документации, для операций, которые в обычных условиях без автоматизации требуют больших человеческих ресурсов. Уменьшение массы космического аппарата – важная задача при его проектировании. Размер сечения провода влияет на его массу, точный расчет его длины позволяет более обоснованно использовать ту или иную марку провода. Помимо электрических особенностей необходимо также учитывать и конструктивные требования при выборе сечения (ломкость, впаиваемость в контакт соединителя и пр.), а также значения перекрытия. Современные методы проектирования кабельных сетей позволяют оптимизировать не только массогабаритные характеристики, но и эксплуатационные параметры космических аппаратов. Комплексный подход к разработке конструкторской документации обеспечивает высокую надежность и долговечность космических аппаратов. Внедрение цифровых технологий в процесс проектирования позволяет существенно сократить время разработки конструкторской документации и минимизировать вероятность ошибок. Интегрированные системы автоматизированного проектирования обеспечивают согласованную работу всех подразделений, участвующих в создании космического аппарата. Постоянное совершенствование методов проектирования и использование передовых технологий позволяют АО «РЕШЕТНЁВ» поддерживать лидирующие позиции в области создания космических аппаратов.

Ключевые слова: анализ данных, предметная область, сечение провода, автоматизация, оптимизация.

Поступила в редакцию 16.01.2026. Принята к печати 26.02.2026.

Введение

Автоматизация процессов разработки конструкторской документации (КД) является одним из важнейших направлений автоматизации процесса выпуска КД бортовой и наземной кабельной

сети (КС). Сегодня внедряются автоматизированные системы проектирования для повышения эффективности выпуска КД, для операций, которые в обычных условиях без автоматизации требуют больших человеческих ресурсов. Анализ сечений проводов позволит в дальнейшем подбирать приемлемое значение сечения провода с учетом длины кабеля после его трассировки на панелях космического аппарата (КА). Так как процессы разработки

✉ ser.zhmeva@gmail.com

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2026

КС выполняются параллельно, конструктор, ответственный за компоновку приборов, изначально закладывает большую длину сегментов кабеля. Однако после уточнения расположения бортовой аппаратуры значения длины сегментов могут значительно отличаться (больше чем на 50 % от изначальной длины).

Подобное завышение длины сегмента провода приводит к тому, что разработчик, ответственный за разработку электрической схемы, указывает сечение больше, чем требуется для обеспечения рабочих характеристик. Помимо обеспечения рабочих характеристик при подборе провода также необходимо руководствоваться принципом повышения надежности функционирования КА. Так, например, подбор провода сечением 0,08 (при условии, что данный провод позволит обеспечить требуемую мощность) зачастую не используется, так как может разрушиться при динамических нагрузках, связанных с этапом выведения КА. Однако излишнее увеличение сечения, а, как следствие, увеличение надежности провода приводит к значимому повышению массы бортовой КС, что значительно повышает расходы на выведение КА.

В текущем порядке разработки КД КС (рис. 1) процесс перерасчета сечения провода не регламентирован и не автоматизирован, и перерасчет сечения происходит только при значитель-

ном изменении, по мнению разработчика, длины провода после личного обращения к ответственному за разработку электрической схемы.

Предлагаемое программное обеспечение (ПО) позволяет автоматизировать процесс разработки КД, используя в качестве исходных данных следующие характеристики:

- 1) значение марки (сечение и материал провода) выбранного разработчиком электрической схемы провода из базы данных кабельных сборок;
- 2) значение длины сегментов провода до окончательного расположения бортовой аппаратуры и трассировки КС;
- 3) значение длины сегментов провода после окончательного расположения бортовой аппаратуры и трассировки КС.

Целью настоящей работы является проведение анализа уже разработанных сборок КС для выявления численных значений влияния автоматизированного перерасчета сечений на итоговое значение марки провода и, как следствие, возможное снижение массы КА без уменьшения показателя надежности функционирования КА.

Для обоснования целесообразности данных этапов необходимо провести анализ влияния длины провода на сечение на примере уже выпущенной документации.

Порядок расчета сечения по мощности

В общем виде расчет сечения кабеля по мощности происходит в 3 этапа. Для этого потребуются следующие данные:

- суммарная мощность всех приборов;
- тип напряжения сети: 100 В, 27 В;
- длина провода;
- материал проводника: медь или алюминий.

1. Потребляемую мощность приборов можно найти в документации на прибор. Формула для расчета общей мощности:

$$\Sigma P_p = (P_1 + P_2 + \dots + P_n), \quad (1)$$

где P_1 , P_2 и т.д. – мощность подключаемых приборов. Для расчета максимальной потребляемой в условиях эксплуатации активной мощности применяется формула:

$$K_c = \frac{P_m}{P_p}, \quad (2)$$

где K_c – коэффициент спроса, который учитывает вероятность включения всех приборов одновременно. K_c определяется так:

- для двух одновременно включенных приборов – 1;
- для 3–4 – 0,8;
- для 5–6 – 0,75;
- для большего количества – 0,7.

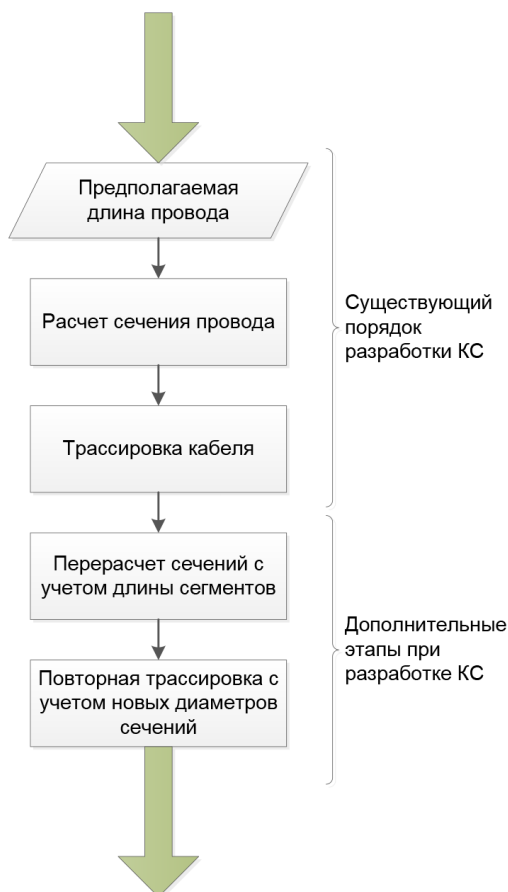


Рисунок 1. Участок процесса разработки КС

2. Расчет сопротивления цепи с учетом известной длины проводника.

Сопротивление определяют по формуле:

$$R = \rho * \frac{L}{S}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление ($0,0175 \frac{\text{Ом} * \text{мм}^2}{\text{м}}$),

L – длина проводника (м), S – площадь его поперечного сечения исходя из имеющихся марок проводов (мм^2).

Чем меньше площадь поперечного сечения проводника, тем выше его сопротивление, а, значит, выше и активная мощность, которая свидетельствует об усиленном нагреве. Исходя из этого, расчет площади сечения необходим для обеспечения безопасности и надежности проводки, а также уменьшения массы готового изделия.

3. Падение напряжения.

Протекая по проводам, ток их нагревает. Чем выше сила тока, тем сильнее происходит нагрев. Для определения токовых потерь используется закон Ома.

$$dU = I * R = \frac{I * \rho * L}{S}, \quad (4)$$

где I – сила тока, А; dU – падение напряжения, В.

Исходя из формулы, очевидно, чем больше сопротивление, тем больше выделяется тепла, т.е. тем сильнее проводник будет нагреваться. Потеря напряжения по длине проводника должна быть не более 5 %.

Расчет проводится с учетом допустимости заделки провода в контакты соединителя.

Для расчета допустимых сечений на КА используются данные о длине проводов из базы данных (БД) и разработанное для решения данной задачи ПО (рисунок 2). ПО проводит расчет и проверяет возможность заделки расчетного провода в контакт.

Рассмотрим цепь питания прибора, имеющего наибольшее энергопотребление. Питание осуществляется по шине 27 В. Мощность в штатном режиме по линиям 27 В не более 20 Вт (цепь питания прибора приведена на рисунке 3).

Результаты расчета токовых потерь в зависимости от сечения приведены в таблицах 1 и 2.



Рисунок 2. Главная форма программы

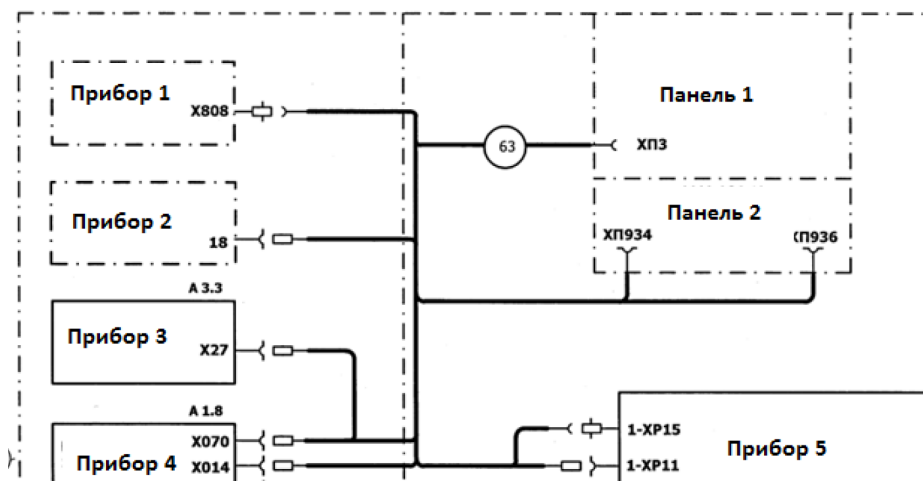


Рисунок 3. Схема, определяющая составные части комплекса и соединения их между собой

Таблица 1

Результаты расчета токовых потерь провода Г13-

Сечения провода, мм ²	0,08	0,12	0,2	0,35	0,5	1
Токовые потери для цепи 27 В, В	1,581	1,054	0,632	0,361	0,253	0,126
Процент потерь для цепи 27 В, %	5,856	3,904	2,342	1,339	0,937	8

Таблица 2

Результаты расчета токовых потерь провода Г12+ #

Сечения провода, мм ²	0,08	0,12	0,2	0,35	0,5	1
Токовые потери для цепи 27 В, В	1,585	1,057	0,634	0,362	0,254	0,127
Процент потерь для цепи 27 В, %	5,871	5,871	2,348	1,342	0,939	0,47

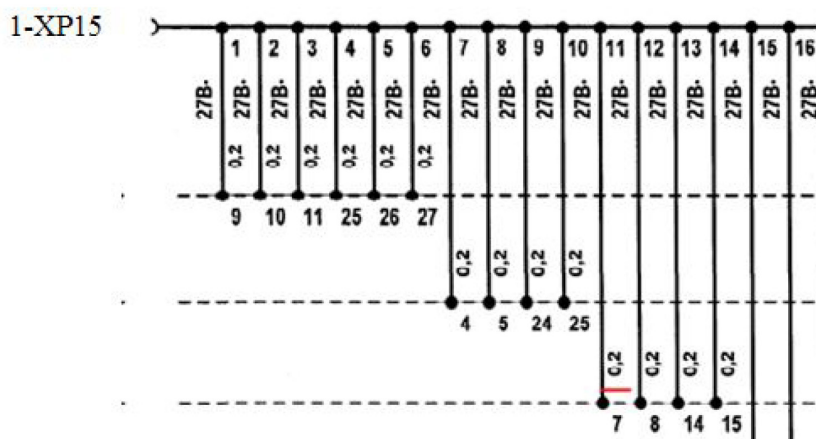


Рисунок 4. Схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и приводящая детальное представление о принципах работы изделия

Конфигурация: соединитель Х27; провод контакт 1 27В-; провод контакт 2 Г13-; при длине провода 4,879.

Конфигурация: соединитель Х27; провод контакт 1 27В+; провод контакт 2 Г12+ #; при длине провода 4,891.

В действительности для данного кабеля подобран провод большего сечения 0.2 (рисунок 4).

Заключение

Расчеты показали, что выбор сечения провода разработчиком схемы не всегда обоснован – полученные путем автоматизированного перерасчета значения указывают, что можно использовать провод с меньшим сечением. Правильно рассчитанный размер сечения позволяет сократить массу применяемого провода в кабеле и, как следствие, уменьшить стоимость вывода КА на околоземную орбиту.

Список литературы

- [1] Волк В.К. Базы данных. Проектирование, программирование, управление и администрирование. 2020. Т. 1. Вып. 3. С. 88–89.
- [2] Добышев Е.В., Юшкова А.В., Пинаев Ф.А. Автоматизированная разработка конструкторской документации на изготовление и испытание сетей космических аппаратов «ALCAB V2». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612882.
- [3] Кочев Ю.В., Ефремов С.В., Овчинников А.В. Оптимизация массовых характеристик кабельной сети космического аппарата с использованием разработанной системы автоматизированного проектирования «АКАБ» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнёва. 2013. № 6 (52). С. 121–125.
- [4] Кокцинская Е.М. Автоматизация расчета кабеля в программе ELCUT // Видеонаука. 2016. № 1 (1). URL: <https://videonauka.ru/stati/13-tekhnicheskie-nauki/39-avtomatizatsiya-raschjota-kabelya-v-programme-elcut> (дата обращения: 19.06.2016).
- [5] Добрынин Е.В., Батищев А.М., Деревяшкин М.В. Совершенствование подхода к расчету сечения токоведущих частей // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 8. С. 174–177. doi: 10.24412/2076–6785–2024–8–174–177.
- [6] Биктулов С.В., Чупахин Я.Н. Разработка высокотехнологичных бортовых кабельных сетей самолетов // Материалы конференции «Системы управления авиастроительным предприятием». 16–17 октября 2014 г.
- [7] Кондрашова Ю.Н. Разработка системы автоматизированного расчета для определения рационального сечения и уровня напряжения линий электропередачи 10–35 кВ с целью повышения экономической эффективности расчетных значений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 36–47. doi: 10.14529/power220104.

- [8] Ефентьев С. Н. Развитие методики технико-экономического анализа при выборе основных параметров электрических сетей с учетом неопределенности исходной информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. М.: НИУ МЭИ, 2004. 205 с.
- [9] Дмитриев М. В. Заземление экранов кабелей в сетях 20 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 2 (41). С. 72–75.

AUTOMATED CALCULATION OF WIRE CROSS-SECTIONS FOR ON-BOARD CABLE NETWORKS OF SPACECRAFTS

S. O. Shestakov¹, A. M. Butin¹, Yu. S. Lomaev²

¹ JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
Krasnoyarsk, Russian Federation

Satellites created by JSC «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems» provide a wide range of services both in Russia and far beyond its borders. When creating a spacecraft, a significant amount of attention is paid to the spacecraft's cable network. The automation of design documentation development processes is one of the main areas of focus for the design and automation of cable network systems division. Automated design systems are implemented to enhance the efficiency of design documentation production and operations that would otherwise require significant human resources. Reducing the mass of a spacecraft is an important task during its design. The cross-section size of a wire affects its mass, and accurately calculating its length allows for a more reasonable use of a particular wire type. In addition to electrical considerations, it is also necessary to take into account the structural requirements when selecting the cross-section (fragility, solderability to the connector contact, etc.).

Keywords: data analysis, subject area, wire cross-section, automation, optimization.

Submitted: 16.01.2026. Accepted: 26.02.2026.

References

- [1] Volk V.K. *Bazy` danny`x. Proektirovanie, programmirovaniye, upravleniye i administrirovaniye* [Databases. Design, Programming, Management, and Administration]. 2020, vol. 1, issue 3, pp. 88–89. (In Russian)
- [2] Dobyshev E. V., Yushkova A. V., Pinaev F. A. *Avtomatizirovannaya razrabotka konstruktorskoj dokumentacii na izgotovleniye i ispytaniye setej kosmicheskij apparatov «ALCAB V2»* [Automated Development of Design Documentation for the Manufacture and Testing of ALCAB V2 Spacecraft Networks]. Certificate of State Registration of Computer Program, no. 2017612882, 2017. (In Russian)
- [3] Kochev Yu. V., Efremov S. V., Ovchinnikov A. V. *Optimizaciya massovy`x xarakteristik kabel`noj seti kosmicheskogo apparata s ispol`zovaniem razrabotannoj sistemy` avtomatizirovannogo proektirovaniya «AKAB»* [Optimization of Mass Characteristics of a Spacecraft Cable Network Using the Developed AKAB Automated Design System] // Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev, 2013, no. 6 (52), pp. 121–125. (In Russian)
- [4] Kokkinkaia E. M. *Avtomatizaciya rascheta kabelya v programme ELCUT* [Automation of Cable Calculation in the ELCUT Program] // Videonauka, 2016, no. 1 (1). URL: <https://videonauka.ru/stati/13-tehnicheskie-nauki/39-avtomatizatsiya-raschjota-kabelya-v-programme-elcut> (accessed 19.06.2016). (In Russian)

- [5] Dobrynin E.V., Batishchev A.M., Derevyashkin M.V. *Sovershenstvovanie podxoda k raschetu secheniya tokovedushhix chastej* [Improving the approach to calculating the cross-section of current-carrying parts] // Exposure Oil Gas, 2024, no. 8, pp. 174–177. doi: 10.24412/2076–6785–2024–8–174–177. (In Russian)
- [6] Biktulov S.V., Chupakhin Ya.N. *Razrabotka vy`sokotekhnologichny`x bortovy`x kabel`ny`x setej samoletov* [Development of High-Tech Onboard Aircraft Cable Networks] // Proceedings of the conference «Aircraft Manufacturing Enterprise Management Systems». October 16–17, 2014. (In Russian)
- [7] Kondrashova Yu.N. *Razrabotka sistemy` avtomatizirovannogo rascheta dlya opredeleniya racional`nogo secheniya i urovnya napryazheniya linij e`lektroperedachi 10–35 kV s cel`yu povy`sheniya e`konomie-skoj e`ffektivnosti raschetny`x znachenij* [Development of an Automated Calculation System for Determining the Rational Cross-Section and Voltage Level of 10–35 kV Power Transmission Lines in Order to Improve the Economic Efficiency of Calculated Values] // Bulletin of SUSU. Series «Power Engineering», 2022, vol. 22, no. 1, pp. 36–47. doi: 10.14529/power220104. (In Russian)
- [8] Efentiev S.N. *Razvitie metodiki tekhniko-e`konomie-skogo analiza pri vy`bore osnovny`x parametrov e`lektricheskix setej s uchetom neopredelennosti isxodnoj informacii* [Development of a Methodology for Technical and Economic Analysis in Selecting the Main Parameters of Electrical Networks Taking into Account the Uncertainty of the Initial Information]. Diss. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.14.02. Moscow, National Research University MPEI, 2004, 205 p. (In Russian)
- [9] Dmitriev M.V. *Zazemlenie e`kranov kabelej v setyax 20 kV* [Grounding of Cable Shields in 20 kV Networks] // Electric power. Transmission and Distribution, 2017, no. 2 (41), pp. 72–75. (In Russian)

Сведения об авторах

Шестаков Сергей Олегович – инженер-программист 1-й категории АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва, аспирант Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Бутин Андрей Михайлович – ведущий инженер-программист АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва.

Ломаев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва.