

УДК: 621.3.062

DOI: 10.53816/23061456_2022_9–10_20

**МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАЗЕМНОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ И ПУСКА
РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА КОСМОДРОМА**

**MODEL OF ELECTRICAL CABLE SYSTEM GROUND-BASED
TECHNOLOGICAL EQUIPMENT PREPARATION AND THE LAUNCH
OF SPACE ROCKETS AND THE MEANS OF THE MEASURING COMPLEX
OF THE COSMODROME**

Канд. воен. наук Н.В. Груздев, д-р техн. наук А.Г. Тарасов, И.К. Миляев

Ph.D. N.V. Gruzdev¹, D.Sc. A.G. Tarasov¹, I.K. Milyaev²

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

²Государственный испытательный космодром МО РФ

В статье проведен анализ подходов к системам контроля электрических связей оборудования экспериментально-испытательной базы космодрома и выделены их особенности. На основе результатов анализа сформулирован новый термин — электрическая кабельная система и представлена ее обобщенная математическая модель. С учетом особенностей контроля наземного технологического оборудования подготовки и пуска ракет космического назначения, а также средств измерительного комплекса космодрома разработаны различные варианты представления математической модели электрической кабельной системы наземного технологического оборудования.

Ключевые слова: электрические цепи, проверка исправности, матрица целостности, матрица разобщения, наземное технологическое оборудование, средства измерительного комплекса космодрома.

The article analyzes approaches to control systems of electrical connections of the equipment of the experimental and test base of the cosmodrome and highlights their features. Based on the results of the analysis, a new term is formulated — an electric cable system and its generalized mathematical model is presented. Taking into account the peculiarities of the control of ground-based technological equipment for the preparation and launch of space rockets, as well as the means of the measuring complex of the cosmodrome, various variants of the representation of the mathematical model of the electrical cable system of ground-based technological equipment have been developed.

Keywords: electrical circuits, serviceability check, integrity matrix, separation matrix, ground-based technological equipment, means of the measuring complex of the cosmodrome.

Введение

Современные системы подготовки и пуска ракет космического назначения (РКН), а также

средства измерительного комплекса космодрома (ИКК) сложны не только с точки зрения большого количества оборудования и аппаратуры, разнообразия внутренних систем [1], но и с точки

зрения большого разнообразия электрических линий в виде кабелей, проводов, клемных колодок и т.п. Данные системы отличаются от своих предшественников большим количеством различных типов электрических цепей и их сложной схемой внутренних связей. В эксплуатационной документации (ЭД) используются различные виды представления электрических связей или цепей. Для организаций-разработчиков и предприятий-изготовителей систем подготовки и пуска РКН и средств ИКК не существует единой концепции подходов к системам контроля электрических связей, в особенности, когда одни предприятия разрабатывают оборудование, а другие производят системы контроля.

Новое поколение образцов ракетно-космической техники (РКТ) требует принципиально новых методов испытаний, выдвигающих, в свою очередь, принципиально более высокие требования к испытательному оборудованию. Кроме того, ввиду усложнения проверок бортовой аппаратуры РКН и скачкообразного роста их количества единственным способом ускорения и удешевления испытаний является автоматизация процесса испытаний. Увеличение количества традиционных систем или расширение количества каналов в них приводит к экспоненциальному росту затрат на наземное оборудование и не обеспечивает требуемое качество испытаний. Только кардинальное изменение подхода к созданию наземной контрольно-измерительной аппаратуры может решить эту проблему. Повышение надежности и безопасности изделий РКТ и объектов экспериментально-испытательной базы (ЭИБ) космодрома является одной из приоритетных задач ракетно-космической отрасли [2, 3].

Электрическая кабельная система как элемент экспериментально- испытательной базы космодрома

Контроль исправности оборудования может проводиться различными приборами и с помощью различных программных средств. До начала тестирования работы оборудования проводится контроль электрических цепей или связей.

Виды контроля электрических связей:

- проверка целостности цепей;
- проверка разобщения цепей;

– проверка изоляции цепей (между цепью и корпусом).

Цель контроля электрических связей — до начала тестирования и штатного использования системы удостовериться в соответствии существующих электрических связей требованиям эксплуатационной документации.

Для удобства проведения контроля электрические связи представляются в виде схем, наборов таблиц соединений и т.п. Отличительными особенностями электрических связей внутри существующего наземного технологического оборудования (НТО) подготовки и пуска РКН и средств ИКК являются:

- большое количество протяженных электрических цепей;
- сложная топология внутренних соединений;
- наличие в составе проверяемых связей различных электро-радиоизделий (ЭРИ) и коммутационных элементов;
- эксплуатация кабелей и оборудования в неблагоприятных условиях внешней среды.

Согласно требований стандарта [4], кабельная (коммуникационная) система — это система физических каналов для передачи электрических и оптических сигналов, включающих телекоммуникационные кабели и коммутационные элементы.

Согласно требований стандарта [5], электрическая сеть представляет совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их линий электропередач, предназначенных для передачи и распределения электрической энергии по ГОСТ 19431.

Объединив два определения, введем новый термин — электрическая кабельная система (ЭКС), которая представляет собой систему физических каналов для передачи электрических сигналов и электрической энергии, включающая коммутационные элементы и устройства, а также линии, соединяющие их. Новый термин введен с целью выделения в составе образца вооружения (военной техники) ЭИБ той ее части, которая в данный конкретный момент времени подвергается проверке или сконфигурирована для выполнения определенных функций. В процессе эксплуатации или во время работы образца вооружения (военной техники) ЭКС могут изменяться, так как в них могут присутствовать коммутационные и другие элементы, которые

могут создавать или изменять электрические связи внутри ЭКС.

Примерами таких ЭКС являются: электрическая сеть питания и управления оборудованием, наземная кабельная сеть контрольно-проверочной аппаратуры космического средства, кабельная сеть средств ИКК, бортовая кабельная сеть космического средства.

В каждый конкретный момент времени ЭКС может иметь различное состояние, поэтому для контроля исправности ЭКС оборудование, как правило, приводят в исходное состояние согласно ЭД, но в процессе работы оборудования возникают ситуации, когда необходимо провести дополнительный контроль исправности (состояния) ЭКС, например, при поиске и устранении неисправности, тогда оборудование стараются зафиксировать в статичном состоянии и контроль исправности новой ЭКС проводят в максимально сжатые сроки, чтобы не изменилось текущее состояние новой ЭКС [6, 8].

Математическая модель электрической кабельной системы

Математическую модель ЭКС, учитывающую виды контроля исправности, можно представить как набор матриц сопротивлений, состоящий из матриц целостности, разобщенности и изоляции цепей.

Матрица целостности цепей:

$$\mathbf{R}_{\text{ЭКС}}^{\text{ц}} = [r_i, g_i], i = \overline{1, n},$$

где n — количество электрических цепей в ЭКС;

r_i — значение активного электрического сопротивления в цепи i ;

g_i — значение реактивного электрического сопротивления в цепи i .

Матрица разобщенных цепей:

$$\mathbf{R}_{\text{ЭКС}}^{\text{р}} = [r_{ij}, g_{ij}], i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

где r_{ij} — значение активного электрического сопротивления между цепями i и j ;

g_{ij} — значение реактивного электрического сопротивления между цепями i и j .

В матрице $r_{ii} = 0$ и $g_{ii} = 0$, так как не существует сопротивления в одной точке. Также

$r_{ij} = r_{ji}$ и $g_{ij} = g_{ji}$ — одно и то же сопротивление между цепями i и j .

Матрица изоляции цепей:

$$\mathbf{R}_{\text{ЭКС}}^{\text{и}} = [r_j^{\text{и}}, g_j^{\text{и}}], j = \overline{1, n},$$

где $r_j^{\text{и}}$ — значение активного электрического сопротивления между цепью j и корпусом;

$g_j^{\text{и}}$ — значение реактивного электрического сопротивления между цепью j и корпусом.

Представления ЭКС в виде матриц обусловлено возможностью их агрегирования, когда с помощью нескольких матриц простых ЭКС, возможно путем математической конкатенации создать новые матрицы сложной ЭКС, включающей простые ЭКС [7].

Контроль НТО подготовки и пуска РКН и средств ИКК также включает в себя контроль исправности ЭКС НТО, но согласно ЭД в большинстве ЭКС НТО описываются только электрические цепи или связи с активным электрическим сопротивлением, реактивные составляющие электрического сопротивления принимаются равным нулю или не учитываются. Кроме этого, при проверке исправности ЭКС используется только допусковое оценивание активного электрического сопротивления электрических цепей, вместо использования его точного значения. Это вызвано тем, что большинство электрических цепей имеют большую протяженность, а измерение реактивного электрического сопротивления не производится. Используемые при этом средства измерения не обладают нужными показателями по величине измерительного тока (напряжения), что связано с обеспечением безопасности при проверке электрических цепей, поэтому за время, определенное технологическим графиком, либо выделяемое на поиск и устранение неисправности, средство измерения не может «зарядить» паразитную емкость в электрической цепи. Соответственно, измеренное значение активного электрического сопротивления будет отличаться от реального. Согласно требований нормативно-технический документов и конструкторской документации, учитываемых при проектировании оборудования, все электрические цепи внутри ЭКС этого оборудования имеют показатели, находящиеся в определенных пределах, а также в ЭД данного оборудования разработа-

ком технологии проверки исправности электрических цепей используется только допусковый контроль замеров активного электрического сопротивления [9].

Из-за описанных особенностей средств измерения, применяемых для контроля электрических цепей НТО, величина измеренного активного электрического сопротивления проверяемой цепи может отличаться, так как средство измерения может быть подключено к ней с разной полярностью, из-за протекания тока через реактивную составляющую электрического сопротивления цепи в противоположных направлениях.

Обобщив изложенное, возможно выделить особенности контроля НТО подготовки и пуска РКН и средств ИКК:

- проводится анализ только значения активного электрического сопротивления;
- оценивается допусковое значение показателей исправности электрических цепей, вместо использования точного значения;
- возможно различие измеренных сопротивлений при подключении средства измерения в разных полярностях к измеряемым цепям;
- наличие в составе ЭКС НТО различных ЭРИ и коммутационных элементов НТО.

Модель ЭКС НТО, учитывающая описанные особенности, возможно представить в сокращенном варианте описанной математической модели ЭКС.

Сокращенная матрица целостности цепей:

$$\mathbf{R}^{\text{ц}} = [r_i], i = \overline{1, n},$$

где r_i — значение активного электрического сопротивления в цепи i .

Матрица сопротивлений:

$$\mathbf{R} = [r_{ij}]; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

где r_{ij} — значение активного электрического сопротивления между цепями i и j ;

$r_{jj} = r_j^{\text{н}}$ — значение активного электрического сопротивления между цепью j и корпусом.

В матрице r_{ij} и r_{ji} могут быть не равны, так как между цепями i и j могут быть элементы с «диодным» эффектом, по-разному пропускающие ток в противоположных направлениях.

Для удобства проведения контроля ЭКС НТО представим матрицы сопротивлений в виде

таблиц, которые возможно использовать в автоматизированных системах контроля ЭКС.

На основании матрицы сопротивлений $\mathbf{R}$ составляется общая таблица сопротивлений:

$$\mathbf{R}^* = [r_{ij}^*]; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

где r_{ij}^* — приведенное значение активного электрического сопротивления между цепями i и j .

При преобразовании матрицы сопротивлений $\mathbf{R}$ в общую таблицу сопротивлений $\mathbf{R}^*$ элементы r_{ij} транслируются из матрицы в таблицу без изменений.

Особенность состоит в том, что если в строке или столбце матрицы присутствуют более одного сопротивления связи, то существует неучитываемая в матрице связь между цепями. Поэтому в общей таблице сопротивлений появляются новые элементы в соответствии со следующим правилом:

$$r_{ij}^* = r_{iA} + r_{Bj}.$$

На основании сокращенной матрицы целостности цепей $\mathbf{R}^{\text{ц}}$ и общей таблицы сопротивлений $\mathbf{R}^*$ составляются проверочные таблицы сообщений, связей и разобщения. В проверочных таблицах с помощью столбцов и строк «+» и «-» учитывается полярность подключения средства измерения к проверяемой цепи.

Проверочные таблицы сообщений, если $K \geq 1$ (K — количество групп сообщенных цепей):

$$\mathbf{X}^k = [x_{ij}^k]; k = \overline{1, K}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

где $x_{ij}^k = 1$ — между цепями i и j в группе k есть электрическое сообщение, иначе $x_{ij}^k = 0$;

$x_{ii}^k = 1$ — существует целостность цепи i , иначе $x_{ii}^k = 0$ — обрыв цепи i .

Проверочные таблицы связей, если $L \geq 1$ (L — количество групп связанных цепей):

$$\mathbf{Y}^l = [y_{ij}^l]; l = \overline{1, L}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

где $y_{ij}^l = 1$ — между цепями i и j в группе l есть электрическая связь, иначе $y_{ij}^l = 0$.

Для каждой матрицы связи существует значение сопротивления $R_i^{\text{св}}$, которое определено с помощью анализа $\mathbf{R}^*$:

$y_{ij}^l = 1$ — в цепи i существует сопротивление R_i^{CB} , иначе $y_{ii}^l = 0$ — существует целостность цепи i , проверка обрыва цепи i планируется при проверке таблиц сообщений.

Проверочная таблица разобщения:

$$Z = [z_{ij}], i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

где $z_{ij} = 1$ — электрические цепи i и j разобщены, иначе $z_{ij} = 0$;

$z_{jj} = 1$ — электрическая цепь j разобщена с корпусом, иначе $z_{jj} = 0$.

Если существует возможность свернуть матрицы, то сокращается общее количество их элементов. Кроме того, такое представление ЭКС удобно для машинного использования в автоматизированных приборах контроля состояния ЭКС.

Пример ЭКС НТО, состоящей из 6 проверяемых цепей, представлен на рисунке, табл. 1–7.

Сокращенная матрица целостности цепей и матрица сопротивлений имеют вид:

$$R^{\Pi} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

и

$$R = \begin{bmatrix} \infty & 0 & 0 & \infty & \infty & \infty \\ 0 & \infty & 0 & \infty & \infty & \infty \\ 0 & 0 & \infty & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & \infty & R_I & R_{II} \\ \infty & \infty & \infty & R_I & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & R_{II} & \infty & \infty \end{bmatrix}.$$

Учитывая, что между цепями 5 и 6 существует связь, неучтенная в матрице сопротивлений, то в общей таблице сопротивлений $R_{56} = R_{65} = R_I + R_{II}$, табл. 1.

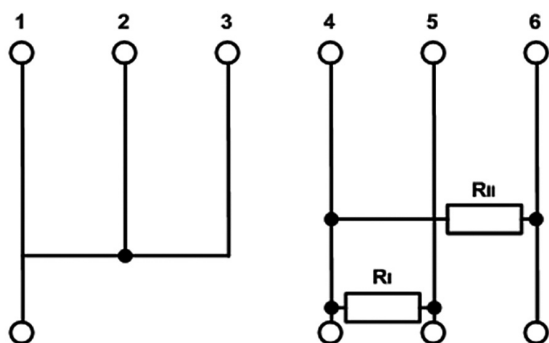


Рис. Пример ЭКС НТО

Таблица 1

Общая таблица сопротивлений

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	1	2	3	4	5	6
1	∞	∞	∞	∞	∞	∞
2	∞	∞	∞	∞	∞	∞
3	∞	∞	∞	∞	∞	∞
4	∞	∞	∞	∞	R_I	R_{II}
5	∞	∞	∞	R_I	∞	$R_I + R_{II}$
6	∞	∞	∞	R_{II}	$R_I + R_{II}$	∞

Таблица 2

Таблица сопротивлений сообщения цепей

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0

Таблица 3

Проверочная таблица сообщения

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	1	2	3
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1

Таблица 4

Таблицы сопротивлений связанных цепей

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	4	5
4	0	R_{45}
5	R_{54}	0

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	4	6
4	0	R_{46}
6	R_{64}	0

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	5	6
5	0	R_{56}
6	R_{65}	0

Таблица 5

Проверочные таблицы связей

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	4	5
4	0	1
5	1	0

$$R_1^{CB} = R_{45} = R_{54}$$

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	4	6
4	0	1
6	1	0

$$R_2^{CB} = R_{46} = R_{64}$$

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	5	6
5	0	1
6	1	0

$$R_3^{CB} = R_{56} = R_{65}$$

Таблица 6

Таблица сопротивлений разобихения и изоляции цепей

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	1	4	5	6
1	∞	∞	∞	∞
4	∞	∞	∞	∞
5	∞	∞	∞	∞
6	∞	∞	∞	∞

Таблица 7

Проверочная таблица разобихения

$\begin{smallmatrix} + \\ - \end{smallmatrix}$	1	4	5	6
1	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1

Заклучение

Разработанная модель электрической кабельной системы учитывает особенности контроля наземного технологического оборудования и средств измерительного комплекса космодрома, а именно:

– при проведении контроля НТО проводится анализ значений только активного электрического сопротивления;

– при проведении контроля НТО проводится допусковое оценивание показателей исправности электрических цепей вместо использования точного значения;

– модель учитывает подключение средств измерения в различной полярности и наличие в составе ЭКС НТО различных ЭРИ и коммутационных элементов НТО.

Использование разработанной модели позволит сократить количество элементов контроля и повысить автоматизацию контроля электрической кабельной системы за счет применения матриц сопротивлений и проверочных таблиц.

Литература

1. Нестечук А.Н., Крупский К.А., Хлебников С.Г. Методика выбора рационального варианта развития экспериментально-испытательной базы испытательного комплекса Минобороны России в соответствии с потребностями обеспечения испытаний космических средств // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 9–10 (159–160). С. 3–8.

2. Дмитриенко А.Г., Николаев А.В., Ляшенко А.В., Тюрин М.В., Ярославцева Д.А. Элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля изделий ракетно-космической техники и объектов наземно-космической инфраструктуры // Общие вопросы метрологии и измерительной техники. 2018. № 2 (24). С. 5–13.

3. Зайченко С.Н. Современная архитектура построения интегрированных статодинамических модульных информационно-измерительных систем комплексных испытаний авиационной и ракетно-космической техники // Информатизация и системы управления в промышленности. 2009. № 4 (24). С. 24–30.

4. ГОСТ Р 56602-2015 Слаботочные системы. Кабельные системы. Термины и определения. — М.: Стандартинформ. 2020. 28 с.

5. ГОСТ 24291-90 Электрическая часть электростанции и электрической сети. Термины и определения. — М.: Стандартинформ. 2005. 14 с.

6. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандартинформ. 2009. 9 с.

7. Баврин И.И., Матросов В.Л. Краткий курс теории вероятностей и математическая статистика. — М.: Прометей, 1989. 135 с.

8. Хальясмаа А.И., Дмитриев С.А., Коккин С.Е. и др. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 64 с.

9. Любимов И.В., Мешков С.А., Ушаков А.П. и др. Методы и средства диагностирования технических систем: учебное пособие. — СПб.: Балт. гос. техн. Ун-т, 2012. 95 с.

References

1. Nestechuk A.N., Krupsky K.A., Khlebnikov S.G. The methodology of choosing a rational option for the development of the experimental and testing base of the test complex of the Ministry of Defense of Russia in accordance with the needs of ensuring the testing of space assets // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2021. № 9–10 (159–160). Pp. 3–8.

2. Dmitrienko A.G., Nikolaev A.V., Lyashenko A.V., Tyurin M.V., Yaroslavl'tseva D.A. Elements of the concept of building intelligent monitoring and control systems for rocket and space technology products and ground-space infrastructure facilities // General issues of metrology and measuring equipment. 2018. № 2 (24). Pp. 5–13.

3. Zaichenko S.N. Modern architecture of integrated statodynamic modular information and measurement systems for complex tests of aviation and rocket and space technology // Informatization and control systems in industry. 2009. № 4 (24). Pp. 24–30.

4. GOST R 56602-2015 Low-current systems. Cable systems. Terms and definitions. — М.: Standartinform. 2020. 28 с.

5. GOST 24291-90 The electrical part of the power plant and the electrical network. Terms and definitions. — М.: Standartinform. 2005. 14 с.

6. GOST 20911-89 Technical diagnostics. Terms and definitions. — М.: Standartinform. 2009. 9 с.

7. Bavrín I.I., Matrosov V.L. A short course in probability theory and mathematical statistics. — Moscow: Prometheus, 1989. 135 p.

8. Khalyasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E. et al. Diagnostics of electrical equipment of power stations and substations: textbook. — Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-ta, 2015. 64 p.

9. Lyubimov I.V., Meshkov S.A., Ushakov A.P. et al. Methods and means of diagnosing technical system: a textbook. — St. Petersburg: Baltic State Technical University. Un-t, 2012. 95 p.