

СВЧ-микросхемы для бортовой аппаратуры ДЗЗ и систем космической связи

Часть 1

Е. Старовойтов, к. т. н.¹, Е. Скиба², Л. Недашковский³

УДК 621.38 | ВАК 2.2.2

Прогресс космонавтики во многом определяется уровнем развития радиоэлектроники, одним из направлений которой является техника СВЧ, широко используемая в космической связи, навигационных системах космических аппаратов (КА), аппаратуре для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и других областях.

СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К настоящему времени в космической технике освоена большая часть СВЧ-диапазона (от 300 МГц до 300 ГГц). Работа в этой части спектра электромагнитного излучения облегчается тем, что радиоволны испытывают минимальные потери при прохождении через земную атмосферу, легко фокусируются в узкую диаграмму направленности (ДН), а полученные радиолокационные изображения обладают высоким разрешением (до 1 м). Это и определяет основные области применения СВЧ-техники в космосе: связь и радиолокация.

Космическая связь в настоящее время стала неотъемлемой частью современных информационных систем, включающих в себя как низкоскоростные (телефония и пейджинговые сервисы), так и высокоскоростные (интернет, телевидение высокого разрешения и т.д.) каналы передачи данных. В результате продолжающихся возрастать требований к характеристикам космических радиолиний, промышленность выпускает широкую номенклатуру электронной компонентной базы (ЭКБ) для СВЧ-диапазона.

Космические радиолокационные системы широко применяются в ДЗЗ. Большое распространение получило применение радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования, обладающих следующими преимуществами:

- независимостью от метеорологических условий и освещенности земной поверхности;

- высокой точностью измерения геометрических характеристик объектов;
- построением трехмерных карт рельефа местности;
- выявлением внутренней структуры и других свойств объектов наблюдения;
- обнаружением объектов под снежным или растительным покровом, а также подводных объектов по поверхностным проявлениям глубинных процессов в водной среде.

В радиолокационной аппаратуре широко используются активные фазированные антенные решетки (АФАР), позволяющие мгновенно перенацеливать ДН без использования механических приводов (что очень критично для работы в условиях космоса), обеспечивая при этом высокий энергетический потенциал радиолинии. Применение цифровых АФАР (т.н. ЦАР) обеспечивает следующие преимущества:

- высокую помехозащищенность приемо-передающего тракта;
- формирование нескольких приемо-передающих лучей на различных частотах;
- оперативную обработку данных на борту КА.

Широкополосная поляриметрическая ЦАР X-диапазона бортового радиолокатора «Касатка-Р» (разработка АО «НИИ ТП»), предназначенного для ДЗЗ, показана на рис. 1.

Кроме радиолокации, существуют и другие, перспективные с коммерческой точки зрения, направления использования аппаратуры на основе АФАР, применение которых повышает энергетическую эффективность радиолиний. Однако развитие этих рынков возможно при появлении аппаратуры низкого и среднего ценового сегмента. Цена АФАР в основном определяется стоимостью используемых в ней приемо-передающих модулей (ППМ), от которых зависит большая часть тактико-технических характеристик аппаратуры в целом.

¹ АО «НИИМА «Прогресс», заместитель начальника отдела разработки смешанных СВЧ-модулей.

² АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела главного конструктора.

³ АО «НИИМА «Прогресс», ведущий инженер; НИУ МИЭТ, ассистент.

Бортовая радиоэлектронная аппаратура (РЭА) СВЧ-диапазона должна иметь следующие характеристики [1]:

- высокую механическую прочность;
- устойчивость к внешним воздействующим факторам космического полета (вакууму, радиации, механическим нагрузкам);
- высокую вероятность безотказной работы в течение всего срока активного существования КА (до 15 лет);
- низкое тепловыделение;
- минимум паразитных связей по электромагнитным полям соседних компонентов, линий передачи и элементов монтажа;
- высокую добротность согласующих цепей как на распределенных, так и на сосредоточенных элементах;
- малые искажения фазовых характеристик элементов в рабочем диапазоне частот.

Большая часть этих характеристик определяется используемой ЭКБ, от которой также зависит стоимость РЭА и КА в целом. Одними из наиболее критичных для космической техники параметров являются масса и габаритные характеристики, ограниченные возможностями ракеты-носителя и стоимостью выведения полезного груза на целевую орбиту.

При этом СВЧ-устройства поддаются миниатюризации труднее, чем другие разновидности электронной техники. Однако использование новых монолитных интегральных СВЧ-схем позволяет в 2–3 раза снизить массу и габариты бортовой РЭА.

В данной работе из всего многообразия ЭКБ СВЧ-диапазона космического применения будут рассмотрены синтезаторы частоты, квадратурные модуляторы (КМ) и квадратурные демодуляторы (КДМ), широко применяемые в системах связи и радиолокации.

КВАДРАТУРНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СВЧ-СИГНАЛОВ

Управление амплитудой и фазой колебаний СВЧ-диапазона используется в радиотехнических устройствах для формирования несущего информационного сигнала, при электронном управлении пространственным положением и формой ДН, а также во многих других задачах.

Радиосигнал на выходе модулятора можно записать в виде

$$U(t) = u(t) \cos[\omega_0 t + \Phi(t)], \quad (1)$$

где $u(t)$ – закон изменения амплитуды сигнала; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – несущая частота; $\Phi(t)$ – отклонение фазы сигнала от линейного во времени закона.

Квадратурной модуляцией (I/Q модуляцией) называется процесс преобразования сигнала (1) в виде разности двух амплитудно-модулированных колебаний [2]:



Рис. 1. ЦАР бортового радиолокатора «Касатка-Р» (АО «НИИ ТП»)

$$U(t) = \sqrt{\frac{E}{T}} \cdot [I(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - Q(t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)], \quad (2)$$

где $I(t)$ и $Q(t)$ – квадратурные составляющие информационного сигнала; E – энергия битовой посылки; T – длительность элементарной посылки.

КМ имеет два входа для синфазной и квадратурной составляющих, которые умножаются на соответствующий сигнал от высокочастотного генератора и затем суммируются для получения высокочастотного модулированного колебания. Такая схема включения является балансной и позволяет исключить процедуру фильтрации зеркальной составляющей сигнала.

КДМ выделяет информационный сигнал из модулированного сигнала. Распространенная на практике типовая схема радиолонии космической связи с непосредственной модуляцией и демодуляцией СВЧ-сигнала представлена на рис. 2 [3].

В радиопередающем тракте формирователь сигналов (ФС) формирует действительную и мнимую часть комплексной огибающей информационного сигнала, поступающих на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), после которого уже аналоговые сигналы идут на вход КМ, где осуществляется перенос широкополосного сигнала, представленного в виде квадратурных

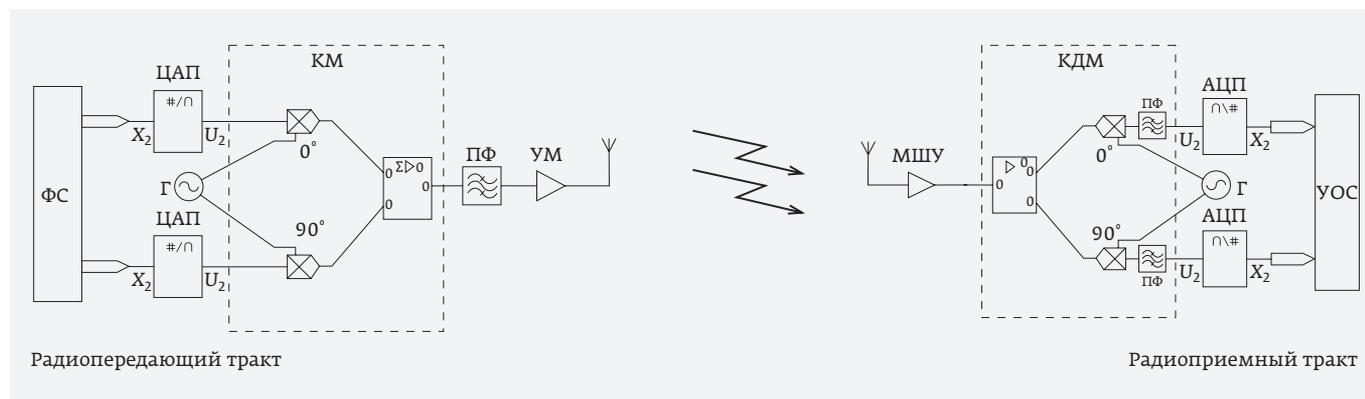


Рис. 2. Схема радиопередающего и радиоприемного трактов СВЧ-сигнала с непосредственной модуляцией и демодуляцией

составляющих (действительной части и мнимой части) на частоту несущего колебания. Генератор (Г) формирует два синусоидальных сигнала несущего колебания, сдвинутых по фазе друг относительно друга на 90° . Полосовый фильтр (ПФ) убирает из сформированного сигнала нежелательные высокочастотные составляющие, возникающие при аналоговой квадратурной модуляции. Далее сигнал усиливается усилителем мощности (УМ) и направляется на передающую антенну.

Распространяющийся по линии «Спутник-Земля» или «Земля-Спутник» радиосигнал через приемную антенну поступает на вход малошумящего усилителя (МШУ), далее проходит фильтрацию с помощью ПФ, после чего попадает на вход аналогового КДМ, где производится выделение квадратурных составляющих и перенос спектра сигнала на «нулевую» частоту. Затем сигнал с выхода КДМ идет на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), после которого уже выдается в устройство обработки информации (УОС).

Работа аппаратуры космической связи, как и других радиотехнических систем, основана на использовании сигналов со стабильными параметрами: частотой, фазой, формой огибающей. Для их получения требуются источники опорных колебаний, устойчивые по отношению к различным дестабилизирующим воздействиям, а также позволяющие изменять параметры создаваемых сигналов.

Этими источниками являются синтезаторы частоты – специальные устройства, предназначенные для получения одного или нескольких колебаний, когерентных колебанию высокостабильного эталонного источника сигнала. Они формируют из сигнала фиксированной частоты f_c сигнал на связанной с ней желаемой частоте и с желаемой фазой

$$f_{\text{вых}} = \varepsilon \cdot f_c, \quad (3)$$

где ε – масштабирующий множитель (нормированная частота).

Синтезаторы частоты могут быть построены на базе аналоговой или цифровой схмотехники, также существуют гибридные устройства и схемы на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Синтезаторы прямого аналогового синтеза (Direct Analog Synthesis, DAS) обладают широкой полосой перестройки, малым уровнем шума и низким уровнем паразитных спектральных составляющих выходного сигнала, но имеют громоздкую конструкцию и высокую цену.

Прямые цифровые синтезаторы (Direct Digital Synthesizer, DDS) строятся на основе вычислительных операций с кодами отсчетов сигнала и выходного ЦАП, обеспечивают малые погрешности установки параметров, имеют широкие возможности по модуляции, небольшое время перехода от одной частоты к другой, но их выходные частоты ограничены быстродействием цифровых узлов.

Синтезатор DDS преобразует последовательность импульсов тактового сигнала в аналоговое колебание, как правило, синусоидальной, треугольной или прямоугольной формы. В случае синусоидальных выходных сигналов преобразователь фазы в цифровой код обычно представляет собой таблицу значений синуса. Фазовый аккумулятор осуществляет суммирование текущего значения с величиной N для формирования частоты, равной

$$f_{\text{вых}} = \frac{N}{2_M} \cdot f_c, \quad (4)$$

где N – количество импульсов частоты f_c , соответствующее приращению выходного значения фазового аккумулятора; M – разрешение слова настройки [4].

В связи с тем, что изменение N приводит к мгновенному изменению частоты и фазы выходного сигнала, то, по определению, архитектура DDS не дает разрывов фазы

сигнала, что является критическим требованием во многих задачах. Кроме того, в отличие от аналоговых систем, таких как системы ФАПЧ, синтезатор DDS не требует времени на стабилизацию контура.

УПРАВЛЕНИЕ АФАР ДЛЯ РСА ДЗЗ

Современные РСА космического базирования являются эффективными и многофункциональными средствами ДЗЗ с широким спектром возможностей. В последние годы наблюдается переход к применению более компактных систем на базе малых КА. Как правило, в РСА используется импульсный режим зондирования, позволяющий упростить антенную систему и предоставляющий больше возможностей для вариаций технических характеристик. Основным временным параметром съемки является частота повторения зондирующих импульсов [5].

К генераторам опорных частот и сигналов, используемым в космических РСА, предъявляются жесткие требования по стабильности частоты, обеспечивающей повторяемость материалов радиолокационной съемки, и фазовым искажениям для предотвращения появления ложных боковых лепестков ДН антенного полотна [6].

Конструкция ЦАП позволяет вести электронную настройку и подстройку в полете КА за счет крайне малого дискрета управления фазой сигнала. Фазовые сдвиги формируются цифровыми синтезаторами частот, однако их большое количество снижает надежность и увеличивает потребляемую мощность аппаратуры [7].

Наибольшую площадь среди микросхем, используемых в ППМ АФАР, имеют ступенчатые многоразрядные аттенюаторы и фазовращатели, служащие для формирования ДН антенны. При этом требуемая площадь обусловлена физическими принципами работы приборов, а стоимость доминирующих в данной аппаратуре микросхем на основе GaAs прямо пропорциональна их площади [8].

Альтернативой использованию этих дорогостоящих компонентов в составе АФАР является построение

диаграммообразующих цепей ППМ на основе принципа квадратурной амплитудной модуляции [7, 8].

В квадратурной АФАР (рис. 3) сигналы нужных фаз формируются путем сложения сигналов двух квадратурных сигналов с соответствующими амплитудами. В передающем тракте каждого ППМ имеется КМ, на высокочастотный вход которого подается заранее сформированный сигнал на несущей частоте f_n . Изменение амплитудно-фазовой характеристики несущей достигается путем подачи на синфазный и квадратурный входы модулирующих сигналов, которые изначально формируются в цифровом виде в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), а затем преобразуются в аналоговую форму в ЦАП. В КМ формируется фаза сигнала в зависимости от разницы входных напряжений на устройстве. Управляя каждым квадратурным модулятором с помощью ЦАП, можно получить суммарный сигнал с необходимой фазой на каждом выходе платы передающего тракта многолучевой АФАР [7].

Площадь кристалла КМ на порядок меньше, чем у дискретных аттенюаторов и фазовращателей. При этом точность установки фазы сигнала на порядок превышает уровень, обеспечиваемый дискретными СВЧ-фазовращателями, что важно для снижения уровня боковых лепестков ДН антенного полотна. Ограничениями данного метода является качественная модуляция лишь при мощности сигнала не менее 12...15 дБм, то есть только в трактах передатчика и гетеродина, работающих в режиме насыщения, что не позволяет регулировать амплитуду сигнала в приемном тракте [8].

Для управления амплитудно-фазовым распределением в раскрыве ЦАП на синфазный и квадратурный входы КМ необходимо подать последовательность биполярных многоуровневых импульсов, частота следования которых соответствует требуемой скорости изменения амплитудно-фазового распределения [9].

Реализуемый дискрет фазы и амплитуды КМ не зависит от его внутренней структуры и определяется способом формирования входных I/Q сигналов – разрядностью

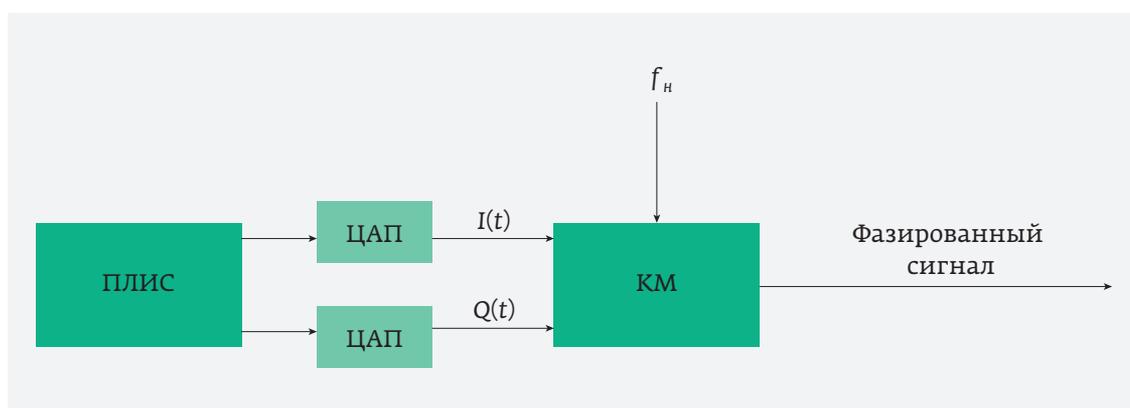


Рис. 3. Структурная схема квадратурной АФАР

ЦАП. Требуемая разрядность ЦАП определяется следующим выражением:

$$N_{\text{ЦАП}} = \lceil \log_2 \frac{2\pi}{\Delta\varphi} \rceil + \lceil \log_2 \frac{1}{\Delta\alpha} \rceil + 1, \quad (5)$$

где $N_{\text{ЦАП}}$ – требуемая разрядность ЦАП; $\Delta\varphi$ – дискрет фазы; $\Delta\alpha$ – дискрет амплитуды.

С помощью КМ возможно одновременное управление фазовым и амплитудным распределением в полотно ЦАР. Изменение амплитуды и фазы выходного СВЧ-колебания осуществляется путем изменения соотношения амплитуд I/Q сигналов

$$A(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}, \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \cot^{-1}\left(\frac{Q}{I}\right), \quad (7)$$

где $I(t)$ – амплитуда синфазного сигнала; $Q(t)$ – амплитуда квадратурного сигнала; $A(t)$ – требуемая амплитуда сигнала на выходе КМ; $\varphi(t)$ – требуемая амплитуда сигнала на выходе КМ.

Для одновременного управления амплитудным и фазовым распределением ЦАР синфазный и квадратурный сигналы должны формироваться в соответствии со следующими выражениями:

$$I_i(t) = E_T \cdot K_{\alpha_i} \cdot \alpha_i(t) \cdot \sin(\varphi_i(t) + \varphi_{Ki}), \quad (8)$$

$$Q_i(t) = E_T \cdot K_{\alpha_i} \cdot \alpha_i(t) \cdot \cos(\varphi_i(t) + \varphi_{Ki}), \quad (9)$$

где φ_i – требуемое значение фазы выходного СВЧ-колебания; α_i – требуемое значение амплитуды выходного СВЧ-колебания; E_T – значение амплитуды выходного напряжения ЦАП; K_{α_i} , φ_{Ki} – амплитудный и фазовый коэффициенты коррекции соответственно.

Каждому значению амплитуды и фазы выходного СВЧ-колебания соответствуют свои коэффициенты коррекции, определяемые на стадии испытаний и в ходе проведения калибровки передающего тракта ППМ.

В космических РСА используют зондирующие сигналы преимущественно с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [7].

Для случая формирования ЛЧМ сигнала на выходе КМ, сигналы синфазного и квадратурного каналов с учетом выражений (8) и (9) записываются следующим образом [9]:

$$I_i(t) = E_T \cdot K_{\alpha_i} \cdot \alpha_i(t) \cdot \sin(\varphi_i(t) + \varphi_{Ki} + 2\pi \frac{b}{2} \cdot t^2), \quad (10)$$

$$Q_i(t) = E_T \cdot K_{\alpha_i} \cdot \alpha_i(t) \cdot \cos(\varphi_i(t) + \varphi_{Ki} + 2\pi \frac{b}{2} \cdot t^2), \quad (11)$$

$$b = \frac{\Delta f}{T_c}, \quad (12)$$

где Δf – девиация частоты; T_c – длительность ЛЧМ сигнала.

Широкое использование квадратурных модуляторов и синтезаторов частот СВЧ-диапазона в бортовой РЭА делает актуальным разработку и производство соответствующей ЭКБ отечественной электронной промышленности для нужд ракетно-космической отрасли. Во второй части будут рассмотрены микросхемы российской разработки, предназначенные для использования в системах связи и радиолокации, рассмотренных выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алыбин В.Г., Алыбин А.В.** Миниатюризация СВЧ-устройств бортовой аппаратуры космического применения // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. Вып. 1, ч. 2. С. 19–20.
2. **Белов Л., Голубков А., Кондрашов А., Карутин А.** Модуляторы сигналов сверхвысоких частот. Основные классы // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 3. С. 76–83.
3. **Фатеева А.С.** Способы построения аппаратуры широкополосной радиосвязи с применением современных электронных компонентов // Оригинальные исследования (ОРИС). № 7. 2018. С. 100–112.
4. **Кронин Б.** Простое и эффективное формирование сигналов при помощи синтезаторов прямого цифрового синтеза частот // Беспроводные технологии. 2012. № 1. С. 59–64.
5. **Храмов К.К., В.В. Костров В.В.** Оценка предельных параметров РСА X-диапазона на базе малых космических аппаратов // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром 2023. С. 294–304. DOI: 10.24412/2304-0297-2023-1-294-304.
6. **Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.** Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
7. **Мацыкин С.В., Савилкин С.Б., Гурковский А.В.** Использование квадратурных модуляторов в передающем тракте активной фазированной антенной решетки X-диапазона // Программные продукты, системы и алгоритмы. 2018. № 2. С. 47–50. DOI: 10.15827/2311-6749.18.2.7.
8. **Воронков О.В., Гаврилов М.М., Кожин С.П., Куприянов З.П., Куприянов П.В., Силаев С.А., Терешкин Е.В.** Некоторые инженерные аспекты технологии квадратурных АФАР // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Вып. 3(554). 2022. С. 44–54.
9. **Добычина Е.М.** Цифровые антенные решетки радиоэлектронных бортовых систем. Дисс. док. техн. наук. М., 2018. 284 с.



РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

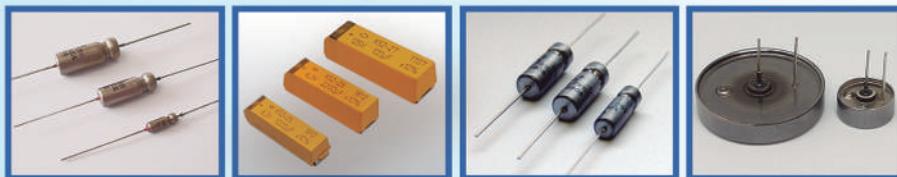
Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 3,2 ... 485
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 1,0 ... 470 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 125



Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 3,2 ... 200
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 1,5 ... 60 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 175



Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 2,5 ... 63
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 0,033 ... 2 200
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 175



Суперконденсаторы K58-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 2,5 ... 2,7
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, 1,0 ... 4 700
Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 65



Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 5,0 ... 48
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, 0,08 ... 783
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 65



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, д. 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48
e-mail: elecond-market@elcudm.ru; www.elecond.ru