

УДК 622.2:620.193
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-96-108

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИИ ГОРНЫХ РАБОТ

А.А. Постнов

Аннотация. Рассматриваются особенности применения химических источников постоянного тока и суперконденсаторов для питания проводных и беспроводных устройств, участвующих в передаче телеметрии горных работ. Актуальность поднимаемых задач обусловлена тем, что такие элементы в составе устройств эксплуатируются на горном оборудовании и технике, а значит подвержены влиянию множества внешних факторов. В качестве примеров приводятся конкретные узлы экскаватора ЭКГ и бурового станка консольного типа, выполняющие соответствующие задачи для открытых горных работ. Производится оценка влияния условий эксплуатации на качественные характеристики ХИТ и суперконденсаторов, низких температур, влаги, агрессивной среды и воздействия вибрации. Обосновывается выбор определенных типов таких источников питания, а также стандарты испытаний и соответствия группам устройств, построенных на их основе. Предлагаются методы защиты этих элементов от воздействия внешних факторов.

Ключевые слова: горные работы; передача телеметрии; химические источники тока; суперконденсатор; ионистор; электрохимическая и химическая коррозия; компаундирование; виброустойчивость и вибропрочность; стандарты испытаний промышленных устройств.

ТОО-КЕН ИШТЕРИНИН ТЕЛЕМЕТРИЯСЫН БЕРҮҮҮ ҮЧҮН ХИМИЯЛЫК ТОК БУЛАКТАРЫН ЖАНА СУПЕРКОНДЕНСАТОРЛОРДУ КОЛДОНУУНУН ӨЗГӨЧӨЛҮКТӨРҮ

А.А. Постнов

Аннотация. Макалада тоо-кен телеметриясын өткөрүүгө катышкан зымдуу жана зымсыз түзүлүштөрдү кубаттоо үчүн туруктуу токтун химиялык булактарын жана суперконденсаторлорду колдонуу өзгөчөлүктөрү каралат. Көтөрүлгөн маселенин актуалдуулугу түзүлүштөрдүн курамындагы мындай элементтер тоо-кен жабдууларында жана техникаларында эксплуатациялангандыгы, демек көптөгөн тышкы факторлордун таасирине дуушар болгондугу менен шартталган. Мисал катары, ачык тоо-кен иштери үчүн тиешелүү тапшырмаларды аткарган атайын ЭКГ экскаватору жана консоль тибиндеги бургулоочу станок агрегаттары келтирилген. Туруктуу токтун химиялык булактарынын жана суперконденсаторлордун сапаттык мүнөздөмөлөрүнө иштөө шарттарынын, төмөн температуранын, нымдуулуктун, агрессивдүү чөйрөнүн жана термелүүнүн тийгизген таасирине баа берилет. Мындай энергия булактарынын айрым түрлөрүн тандоо, ошондой эле алардын негизинде курулган шаймандардын топторуна сыноо жүргүзүү жана шайкештик стандарттары негизделген. Бул элементтерди тышкы факторлордун таасиринен коргоо ыкмалары сунушталат.

Түйүндүү сөздөр: тоо-кен иштери; телеметрия берүү; токтун химиялык булактары; суперконденсатор; ионистор; электрохимиялык жана химиялык коррозия; бириктирүү; титирөөгө туруктуулук жана титирөөгө бекемдик; өнөр жай шаймандарынын сыноо стандарттары.

FEATURES OF APPLICATION OF CHEMICAL CURRENT SOURCES AND SUPERCAPACITORS FOR TRANSMISSION OF MINING TELEMETRY

A.A. Postnov

Abstract. This article discusses the features of using direct current chemical sources and supercapacitors to power wired and wireless devices involved in the transmission of mining telemetry. The relevance of the problems raised is

due to the fact that such elements as part of the devices are used on mining equipment and machinery, and therefore are subject to the influence of many external factors. As examples, specific components of the ECG excavator and a cantilever-type drilling rig are given, which perform the corresponding tasks for open-pit mining. In this regard, an assessment is made of the influence of operating conditions on the quality characteristics of CHS and supercapacitors, low temperatures, moisture, aggressive environments and the effects of vibration. The choice of certain types of such power supplies is justified, as well as testing standards and compliance with groups of devices built on their basis. Methods for protecting these elements from external factors are proposed.

Keywords: mining operations; telemetry transmission; chemical current sources; supercapacitor; ionistor; electrochemical and chemical corrosion; compounding; vibration resistance and vibration strength; testing standards for industrial devices.

Введение. Химические источники тока (ХИТ) получили свое широкое распространение не только для бытовых устройств, но и для промышленной электроники. А развитие КМОП полупроводниковых технологий позволило существенно снизить энергопотребление устройств на их основе. Это позволило существенно уменьшить и их масс-габаритные характеристики. В качестве примера рассмотрим проект и всю сопутствующую документацию для построения устройства, задачей которого является измерение значения окружающей температуры и влажности один раз в минуту с дальнейшей передачей данных телеметрии по беспроводному каналу [1]. Стоит отметить, что питание устройства осуществляется от гальванического элемента CR2032 (240 мАч), а промежуток времени до замены элемента питания достигает 10 лет! Другими словами, ХИТ размером с монету, позволяет обеспечить передачу служебной телеметрии на протяжении столь большого промежутка времени. Однако любой ХИТ имеет конечный срок службы, даже если мы будем использовать современные элементы питания.

По сравнению с ХИТ, больший срок службы имеет элемент Ионистор (Суперконденсатор). По характеристикам он занимает промежуточное положение между конденсатором и химическим источником тока. Это конденсатор, заряд в котором накапливается на границе раздела двух сред – электрода и электролита. Ввиду того, что толщина двойного электрического слоя очень мала, то и величина емкости такого конденсатора доходит до нескольких фарад при напряжении 2–10 В [2]. В настоящее время проводятся исследования в области построения графеновых ионисторов, емкость которых может доходить до десятков килофарад [3]. Соответственно, величины емкостей таких элементов позволяют запастись значительный объем электрической энергии. На рисунке 1 представлен ионистор производства Power RESPONDER. Объем запасаемой электрической энергии такого элемента достигает 11 Вт*ч, диапазон рабочих температур 0 °С...+65 °С. Ссылка на сайт производителя [4].

Такие характеристики современных ХИТ и ионисторов позволяют рассматривать их применение и для питания проводных и беспроводных устройств, участвующих в передаче телеметрии буровых работ. Это связано, с одной стороны, с ограничением свободного места для установки на подвижных элементах горной техники: рукоять или ковш экскаватора, консоль или мачта бурового станка, нож бульдозера и т. д. С другой стороны, непрерывная работа горной техники требует минимизации обслуживания установленной на ней аппаратуры. Кроме этого, стоит учитывать и условия эксплуатации аппаратуры на открытых карьерах и шахтах. Это и высокие уровни вибрации, запыленность (в том числе пыль металлической руды), влажность, воздействие кислых и щелочных подземных вод в шахтах,



Рисунок 1 – Ионистор, емкость 9000 Фарад, ном. напряжение 4 В, габаритные размеры 245×111×5 мм

работа в условиях низких температур (вплоть до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) и др. Все это требует выработки определенного подхода к подбору элементов, разработке методов их защиты и дальнейшему испытанию в составе готовых изделий.

Постановка задачи. Ранее авторами уже рассматривались методы получения полезной энергии для питания беспроводных датчиков, участвующих в передаче телеметрии буровых работ [5]. Актуальность этих решений связана с тем, что до некоторых подвижных элементов горной техники бывает трудно подвести питающий или сигнальный кабель, а порой даже невозможно. Одним из таких примеров является задача получения телеметрии с датчиков, установленных на ковше карьерного экскаватора типа ЭКГ, например в целях решения задачи позиционирования. Ковш закреплен на рукояти, совершающей линейные перемещения в седловом подшипнике (рисунок 2).

Пример экскаватора приведен еще и потому, что непродуманный простой экскаватора, в отличие от другой горной техники, стараются свести к минимуму. Ведь от работы экскаватора зависит производительность горнотранспортного комплекса. А значит датчики и аппараты, установленные на горной технике, должны обладать максимальным межобслуживаемым интервалом. Другим примером является подвижная консоль гидравлического бурового станка. Она обладает таким множеством степеней свободы, что подвод сигнального кабеля к месту установки датчика хоть и возможен, но скручивающие усилия приводят к ограничению ресурса его эксплуатации (рисунок 3). Поэтому применение современных ХИТ и ионисторов для решения задачи электрического питания датчиков и аппаратов на подвижных элементах горной техники открывает новые возможности. ХИТ имеет ограниченный ресурс, но обладает возможностью быстрой замены. Например, в период между рабочими сменами. А ионистор обладает способностью получать электрический заряд от коротких или продолжительных интервалов контакта с источником энергии, накапливать этот заряд и, самое главное, обладает гораздо большим ресурсом циклов заряд-разряд. Рассмотрим в каких условиях эксплуатации работают эти элементы на карьерах и как эти условия влияют на их рабочие характеристики.

Воздействие климатических факторов и агрессивных сред. При построении устройств, эксплуатирующихся на горных работах, должно быть установлено соответствие стандарту «Изделия ГСП, Общие технические условия». ГСП – Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Эта система представляет собой эксплуатационно, информационно, энергетически, метрологически и конструктивно организованную совокупность средств измерений, средств автоматизации, средств управляющей вычислительной техники, а также программных средств [6].

С учетом реальных климатических условий горных карьеров, в частности в северных широтах России, изделия должны соответствовать группе исполнения D2 – диапазон температур окружающего воздуха от -50 до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, верхнее значение относительной влажности 100 % с конденсацией влаги.



Рисунок 2 – Карьерный экскаватор типа ЭКГ и его седловой подшипник



Рисунок 3 – Гидравлическая буровая установка консольного типа

Изделия работают на открытом пространстве и испытывают воздействие различных атмосферных факторов (солнечные лучи и ультрафиолет, дождь, ветер, град, обледенение и снег). Возможны резкие изменения окружающей температуры и образование конденсации. Также изделия группы исполнений D2 должны быть устойчивыми к воздействию других климатических факторов по стандарту «Машины, приборы и другие технические изделия» [7]. Стоит оценивать воздействие на изделие не только статического значения температуры, но и скорости ее изменения. Для группы исполнения D2 – скорость изменения температуры следует выбрать из ряда: 20, 10, 5 °С/ч и устанавливать в технических условиях или стандартах на изделия соответствующих видов [6].

Такой широкий температурный диапазон оказывает непосредственно воздействие на рабочие характеристики ХИТ и ионисторов. Если рассматривать все известные и широкодоступные аккумуляторы, то для большинства их типов не рекомендуется использовать их при температурах выше +50 °С и ниже –25 °С. При более низких температурах аккумуляторы рекомендуется снимать и хранить в теплом помещении. Нарушение температурного режима может привести к сокращению срока службы, ухудшению рабочих характеристик или потере работоспособности. Однако уже известны исследования по улучшению работы аккумуляторов для температур от –40 °С и ниже. Это потребует создания электродов из наноматериалов и специализированных холодостойких электролитов [8]. Однако в настоящий момент элементы на их основе еще не получили широкого распространения. С невозможностью использования аккумуляторов в наших условиях исчезает и их главное преимущество – возможность перезарядки.

При создании устройств для передачи телеметрии горных работ, могут иметь место случаи, когда использование ХИТ все же необходимо. Например, в случае непerezаряжаемого гальванического элемента. Такие элементы по типу химической реакции еще называют первичными. И проблема работы при очень низких температурах здесь стоит не так остро. Как уже отмечалось, одной из особенностей рассматриваемых устройств телеметрии является ограниченные или малые масс-габаритные характеристики. Поэтому мы не рассматриваем в качестве гальванических элементов угольно-цинковые и сухие элементы на основе хлорида цинка. Эти элементы имеют наименьшую из всех удельную емкость, и они не выдерживают работу в условиях низких температур. У щелочных батарей (щелочно-марганцевые) емкость снижается до 86 % при температуре окружающего воздуха всего –15 °С. Гораздо лучше показатель у серебряно-цинковых батарей. Они имеют более широкий температурный диапазон, высокую энергоемкость и энергоплотность, постоянство напряжения. Однако они имеют и довольно высокую цену. Это очень распространенный элемент питания для миниатюрных устройств. Серебряные элементы (оксид серебра) имеют номинальное напряжение 1,5 В. Маркируются SR или Silver oxide. Подобный элемент был упомянут в начале статьи в качестве примера.

Гораздо большую емкость на единицу массы имеют литиевые элементы питания. Из всех гальванических элементов они обладают большим временем хранения, низким саморазрядом, небольшим весом, номинальным напряжением 3.5–4.2 В и способностью работать в широком диапазоне температур эксплуатации.

Компания Tadiran Ltd, основанная в 1958 году в составе военно-промышленного комплекса Израиля, предлагает сегодня литий-тионилхлоридные (Li-SOCl₂) гальванические элементы. Низкотемпературные батареи Tadiran испытывают свои LiSOCl₂-ячейки катушечного типа в криогенной камере, подвергая эти батареи постепенному понижению температуры до –100 °С, и элементы продолжают работать в соответствии с заявленными характеристиками [9]. Так же известны и источники тока этого типа производства АО «Литий-Элемент» (Россия), модель ER34580. Такие элементы в составе батарей широко используются при бурении наклонно-направленных скважин при добыче нефти и газа, для аппаратуры систем забойных параметров скважины, при проведении каротажных работ, передачи телеметрии и т. д. Они являются оптимальным источником питания для устройств с небольшим током постоянного или импульсного энергопотребления. Рассмотрим их основные характеристики на примере модели SL-360/P (Tadiran) (таблица 1).

Таблица 1 – Рабочие характеристики элемента SL-360/P

Физическая величина	Значение
Номинальное напряжение	3.6 В
Максимальная емкость	2.4 А/ч
Номинальный ток разряда	2 мА
Максимальный продолжительный ток разряда	20 мА
Значение саморазряда	0.5% / год
Масса элемента	18 г
Диапазон рабочих температур	-55 °С...+85 °С

На рисунке 4 показан внешний вид гальванических элементов, а на рисунке 5 – их характерная особенность – достаточно сильная зависимость доступной емкости элемента от тока нагрузки. Это прежде всего обусловлено особенностью строения и физическими принципами его работы. Наибольшую крутизну этой зависимости мы можем видеть на графике рисунка 5. Этот график показывает, что чем меньший средний ток нагрузки будет прикладываться к элементу, тем больше мы будем приближаться к заявленной емкости в 2.4 А/ч, особенно при эксплуатации в условиях отрицательных температур. Этого возможно добиться, например с использованием специализированных КМОП-ключей и накопительных конденсаторов. Исключая тем самым постоянное подключение элемента питания к нагрузке и переводя характер потребляемого тока в импульсный режим.

Конструктивные особенности элементов показаны на рисунке 4. В первом случае – с аксиальными выводами позволяют выводить стационарную установку на печатную плату и, соответственно, необслуживаемый характер эксплуатации. Такая установка подходит для устройств, где эти элементы питания используются в качестве резервного. Второй тип элемента может быть выбран в корпусе распространенного элемента АА, широко используемого в бытовых приборах. И это не случайно. В том случае, если у штатных элементов закончился срок эксплуатации, они могут быть заменены на широкодоступные щелочные элементы АА в соответствующем отсеке батарей. Это особенно актуально для горных работ в удаленных регионах.

Рассмотрев влияние температуры эксплуатации на рабочие характеристики гальванических элементов, стоит произвести такую же оценку для ионисторов. Многие их модели не слишком чувствительны к влиянию как положительных, так и отрицательных температур, вплоть до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако значения меньше этой величины могут приводить к деградации электролита, потери емкости, возрастанию ESR и др. Ведутся разработки элементов под названием: Ультра-низко температурные гибкие супер-конденсаторы (Low-temperature flexible supercapacitors LFSCs). Такой элемент остается гибким и сохраняет функциональность хранения энергии при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ благодаря иерархически структурированной автономной мембране из чистого полипиррола. Он обладает высокой циклической стабильностью (сохранение емкости 88,9 % после 1000 циклов), а также гибкостью (падение емкости только на 9,6 % при изгибе на 180°) при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10].

Если же работа устройства не предполагает столь низких температур, то могут быть рассмотрены гибридные элементы на основе водных электролитов, а также электрохимические суперконденсаторы. Они вбирают технологии конденсаторов, ионисторов и ХИТ. При этом получают значительное повышение основных рабочих характеристик, таких как удельная мощность, удельная энергия и др. Однако не все они доступны для широкого применения ввиду высокой цены или малых серий производства [11, 12].

В заявленных условиях эксплуатации выбор конкретной модели является тоже довольно непростой задачей. Большинство современных производителей предлагают элементы с диапазоном рабочих температур от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$... $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, что не соответствуют изделиям группы D2 по нижнему диапазону почти в два раза. Кроме того, необходимо определить, какой объем энергии мы будем запасать



Рисунок 4 – Элементы питания SL-360/P с аксиальными выводами и в исполнении типа AA для установки в отсек питания

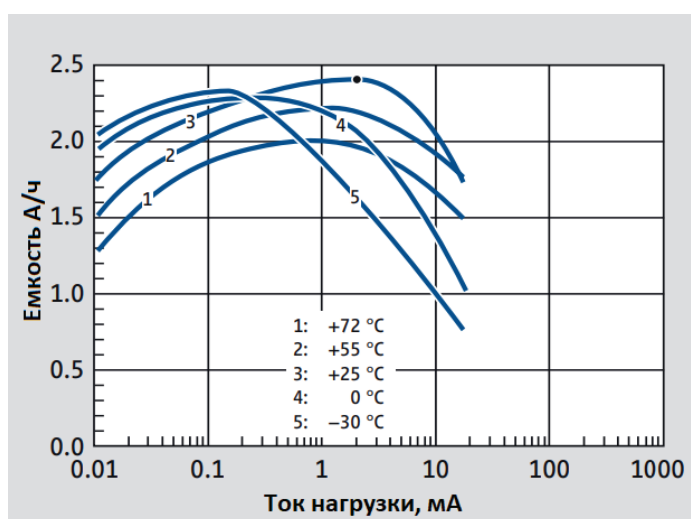


Рисунок 5 – Зависимость емкости элемента питания от тока нагрузки и температуры эксплуатации

и рассчитать соответствующую емкость ионистора. В работе [5] уже рассматривался вопрос оценки необходимой мощности для передачи телеметрии с использованием современной элементной базы. Было показано, что значение полезной мощности 6–10 мВт позволяет обеспечить микросхемы-передатчики (SoC) диапазона частот 864–868,2 МГц для организации беспроводного канала передачи данных. Рассчитаем порядок емкости ионистора, обеспечивающего питание таких условных устройств, в течение, например, одного часа:

$$W_{\text{ион}} = 10 \text{ мВт} \cdot \text{час} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 = 36 \text{ Дж} \quad (1)$$

$$W_{\text{ион}} = \frac{CU^2}{2} \Rightarrow C_{\text{ион}} = \frac{36 \cdot 2}{4} = 18 \text{ Ф}. \quad (2)$$

В формуле (2) значение рабочего напряжения выбрано 2 ввиду того, что большинство производителей рассчитывают эти элементы на низкие максимальные напряжения, особенно если речь идет о больших значениях емкости и эксплуатации в широком диапазоне температур. Это рабочее напряжение в дальнейшем может быть повышено до распространенных в электронике питающих напряжений ≈ 3.3 или ≈ 5 В с использованием step-Up преобразователей. Поиск ионисторов на номинал около 18Ф, 2В привел к производителю KYOCERA AVX и модели SCPB20A156SNA. Этот элемент может работать в диапазоне температур -55 °С... $+85$ °С (рисунок 6). Диаграмма на рисунке 7 показывает относительно стабильное значение емкости с уменьшением на 40 % к нижнему пределу температур. В таких условиях, а также с учетом меньшей емкости, мы сможем запасти только 18 Дж электрической энергии, а значит обеспечить работу условного устройства в течение ~ 30 минут.

Рассмотрим диаграмму эквивалентного последовательного сопротивления на рисунке 7 (ESR), значение которого возрастает в 7 раз при понижении температуры окружающего воздуха до -55 °С. Это следует учитывать при построении устройств на основе этих элементов. Так же стоит отметить, что один из крупнейших порталов по подбору электронных компонентов DigiKey позволяет найти единицы подобных элементов.

Испытания готовых изделий на основе гальванических элементов или ионисторов следует производить в климатической камере Тепло-Холод в соответствии со стандартом «Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов» [13].

Кроме температурного воздействия на рассматриваемые элементы, для группы исполнения устройств D2 следует учитывать воздействие влаги. Эти элементы должны быть помещены в защитную оболочку в соответствии со стандартом «Степени защиты обеспечиваемые оболочками (МЭК 529-89)» [14]. Батарейный отсек или корпус устройства должны обеспечивать класс защиты не менее IP67 – оборудование подвержено сильным атмосферным воздействиям и воздействию воды. Например, установленное на открытом пространстве или в грунте. Но, говоря об устройствах, предназначенных для работы в условиях карьеров и особенно шахт – соблюдения только уровня защиты IP67 может быть недостаточно. По данным Гидрогеологической справки состава шахтных и дренажных вод на одном из рудников северной Якутии, полученной по запросу автора, «Шахтные и дренажные воды на подземном руднике во внепагодковый период представлены крепкими хлоридно-кальциевыми растворами и обладают следующими характеристиками:

1. Минерализация: в среднем $330-360$ г/дм³, максимальное значение $410,8$ г/дм³;
2. pH: от 3,0 до 6,0, в среднем 4,2 ед. pH;
3. Жесткость: от 1400 до 6240 °Ж, в среднем 5130 °Ж;
4. Хлорид-ион: в среднем $227,4$ г/дм³;
5. Гидрокарбонат-ион: в среднем $0,2$ г/дм³;
6. Сульфат-ион: в среднем $0,1$ г/дм³;
7. Кальций: в среднем $79,9$ г/дм³;
8. Натрий+Калий: в среднем $32,3$ г/дм³;
9. Магний: в среднем $13,4$ г/дм³.

Столь подробные сведения о минеральном составе шахтных и дренажных вод приведены потому, что воздействие этих вод происходит непосредственно на корпуса устройств, устанавливаемых на горную технику в шахтах. Состав этого раствора и степень минерализации говорит о том, что кроме процессов химической коррозии элементов конструкции корпуса устройств, возможны и процессы электрохимической коррозии. Особенно быстрым разрушениям могут быть подвержены открытые крепежные элементы из стали и алюминия или, например, незащищенные электрические контакты из меди. Поэтому ограничиваться только степенью защиты IP67 в таких случаях недостаточно.

В стандарте «Единая система защиты от коррозии и старения» [15] определяются всевозможные виды коррозии, в том числе химическая и электрохимическая. А также рассматриваются методы возможной защиты, к которым прежде всего стоит отнести:



Рисунок 6 – Ионистор 15Ф, 2.1В габаритные размеры 48x45x2мм.
темп. диапазон –55°С...+85°С

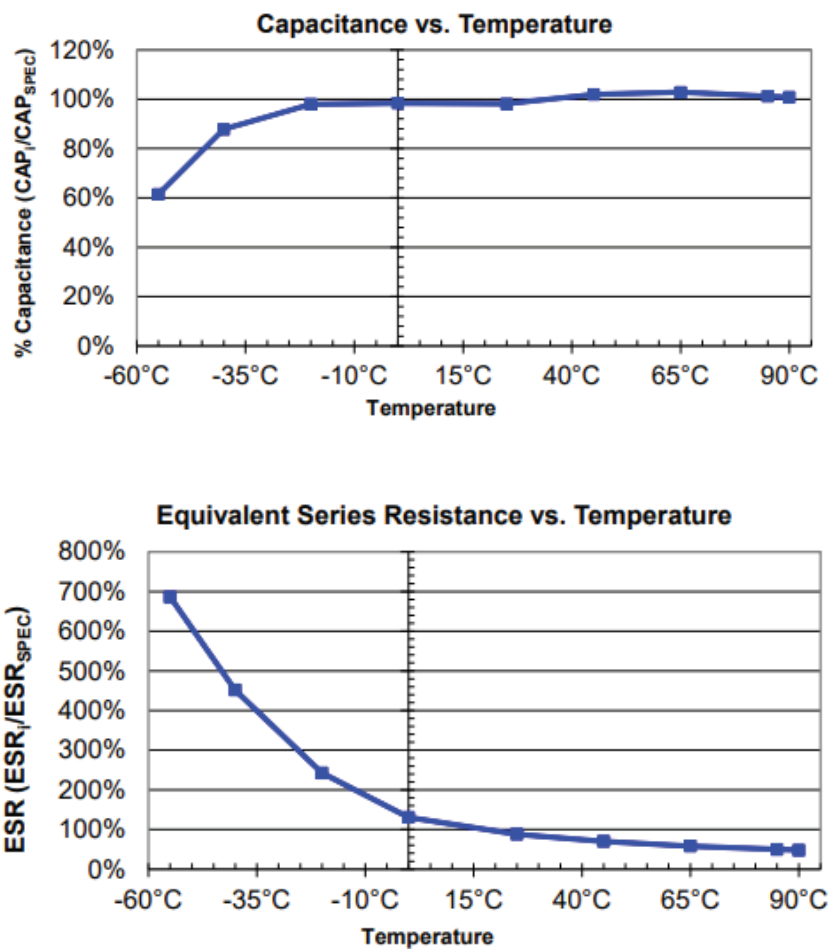


Рисунок 7 – Зависимость емкости ионистора и ESR от температуры эксплуатации

- защитное покрытие – слой или несколько слоев одного материала или различных веществ, которые наносят на поверхность защищаемого металла для защиты от коррозии;
- ингибитор коррозии – вещество, под действием которого в коррозионной среде значительно снижается скорость коррозии металла;
- анодно-катодный ингибитор – ингибитор, под действием которого значительно снижается анодная и катодная реакция коррозионного процесса;
- электрохимическая защита – защита металлов от коррозии, использующая внешний источник постоянного тока для поляризации металла (защитника), который имеет более положительный или более отрицательный потенциал, чем у металла, требующего защиты.

Иногда нанесение обычного защитного покрытия может быть недостаточной мерой в условиях шахт и карьеров из-за возможного присутствия абразивных частиц в водной или водно-воздушной струе. В этом случае в химической промышленности обычно используют нанесение на поверхность тонкого слоя фторопласта (фторлон) методом вакуумного экструдирования. В непроизводственных условиях более реалистичным способом защиты может стать нанесение жидких каучуков. После процесса полимеризации они образуют на поверхности изделия тонкий влагонепроницаемый слой. Фторопласт и особенно каучук являются довольно инертными материалами и практически не вступают во взаимодействие ни с какими химическими соединениями. Поэтому их часто используют в качестве защитных покрытий. Другие приведенные методы борьбы с коррозией технически реализовать сложнее, однако они могут быть незаменимы для эксплуатации изделий, в которых применение металла, например алюминия, для корпуса необходимо и неизбежен контакт с агрессивной средой. Например, в случае применения датчиков или устройств, в которых происходит механическое соприкосновение или трение со своими или внешними элементами.

Воздействие вибрации, компаундирование и стандарты испытаний на виброустойчивость и вибропрочность. Уровни защитных мер и принципы подхода к подбору элементов были бы неполными, если не учитывать вибрацию и методы испытаний на виброустойчивость. Рассмотрим некоторые практические случаи воздействия этих явлений на примере буровых установок, а также методы заводских испытаний в целях повышения надежности конструкции готовых изделий.

Уровень вибраций, воздействующих на машины и механизмы, обычно оценивают по трем физическим величинам: первый – величина ускорения, второй – частота колебаний и третий – амплитуда смещения. Рассмотрим методы оценки уровня ускорений (G), вызванных вибрациями на буровой технике.

«При бурении скважин мы имеем дело с радиальными и крутильными вибрациями. Радиальные вибрации появляются по причине недостаточной осевой нагрузки на долото. В этом режиме бурения на резцы бурового долота действуют силы резания, в разы отличающиеся друг от друга. Резец основного вооружения с максимальной величиной силы резания становится мгновенной осью вращения, не совпадающей с геометрической осью скважины. В результате такого распределения сил долото начинает кидать по забое в радиальных направлениях из стороны в сторону, скалывая основное вооружение.

Крутильные вибрации характеризуются разницей угловых скоростей на поверхности бурильной колонны и на долоте. Это связано с неравномерным вращением долота, как результатом скачкообразного изменения реактивного момента на нем из-за увеличения осевой нагрузки или смены твердости горной породы» [16].

В работе [17] рассматриваются данные телеметрии бурения нефтяных скважин. В частности, приведен анализ влияния виброускорений на эффективность этого процесса. Данные показывают, что разница ускорения свободного падения (G), зарегистрированная непосредственно в забое, многократно превышает значения, полученные на устье. Приводятся данные о значениях ускорения 1–10 G на устье и до 30–45 G – на забое.

Вторым важным параметром при оценке уровня вибрации является выяснение характерных частот колебаний. В работе [18] приводятся данные о низкочастотных вибрациях в диапазоне 2–12 Гц, которые возникают в процессе взаимодействия вращательно-подающего органа с породой.

Вибрации бурового долота через штангу буровой установки передаются непосредственно на вращатель бурового станка. Частично они будут поглощены полиспастной системой подачи, но значительный их уровень распределяется на основные конструкции бурового станка – мачту и раму. А ввиду жесткой связи между этими элементами буровых машин и электронных устройств, закрепленных на них, воздействие вибраций переносится как на сам корпус устройств, так и на внутренние его элементы – гальванические, ионисторы и другие электронные компоненты. Очевидно, что уровни ускорений (G), воздействующие на элементы, не будут зависеть от размеров и массы последних. Однако масса и способ крепления напрямую будут влиять не только на надежность отдельного элемента, но и устройства в целом. Стоит отметить, что все эти рассуждения справедливы для устройств, закрепляемых непосредственно на конструкциях, участвующих в процессе производства буровых работ – мачта, вращатели, механизм смены штанг и т. д. Устройства, закрепленные на других элементах бурового станка, – кабина, рама, двигатель – очевидно не будут испытывать столь сильных вибрационных нагрузок, их значения будут отличаться или будут зависеть от других факторов.

По условиям стандарта «Изделия ГСП, Общие технические условия» [6] наши устройства и элементы в их составе по устойчивости к воздействию синусоидальных вибраций должны соответствовать группе исполнения N3 – Места, подверженные вибрации от работающих механизмов. Типовое размещение на промышленных объектах (таблица 2).

Если первым защитным барьером на пути является надежный корпус изделия, то вибрация воздействует на все составляющие изделия, включая корпус, батареи, ионисторы и другие элементы. Масса литий-тионилхлоридного элемента составляет 18 гр и при испытательном ускорении в 9.8 м/с^2 увеличится почти в 10 раз. Очевидно, что есть большая вероятность того, что элемент или выпадет из отсека питания или повредит свой вывод в колодце пайки печатной платы. Аналогичные явления могут произойти и с ионистором. Можно, конечно, попытаться надежно закрепить элементы к печатной плате или закрепить к корпусу и обеспечить гибкими выводами. Но, во-первых, сама печатная плата достаточно гибкая конструкция, а во-вторых, все элементы будут совершать различные перемещения под действием внешней вибрации. Это будет приводить к постепенному разрушению всей структуры печатной платы. В таких случаях для защиты всех элементов изделия можно использовать компаундирование.

Понятие «компаундирование» имеет множество значений, но в данном случае имеется в виду процесс заливки двухкомпонентным полимером всего внутреннего пространства корпуса, включая печатную плату и все смонтированные на ней элементы. В качестве примера рассмотрим полимер типа КПТД-1 [19]. Жидкий компаунд легко проникает между элементами изделия, вытесняя воздух (рисунок 8). Далее происходит полимеризация при комнатной температуре в твердый резиноподобный материал, в конечном итоге мы получаем равномерно связанную структуру из печатной платы, электронных компонентов и затвердевшего полимера. Особенно актуальна эта защита для тяжелых (в сравнении с другими компонентами электронных устройств) элементов – батарей и ионисторов. В процессе затвердевания полимер не повышает свою температуру, в отличие, например, от эпоксидных смол. В случае необходимости затвердевшая масса может быть удалена из корпуса и очищена от компонентов, по фактуре она похожа на мягкие каучуки. Отдельный класс подобных полимеров обладает теплопроводящими свойствами на основе керамической крошки. Кроме задачи изоляции и защиты компонентов они выполняют еще и роль переноса тепла от горячих элементов к стенкам корпуса изделия.

Зная порядок воздействующих сил, необходимо проводить соответствующие заводские испытания готовых изделий на виброустойчивость и вибропрочность в соответствии со стандартом «Методы

Таблица 2 – Требования по внешним воздействиям для группы устройств N3

Физическая величина	Значение
Частота колебаний	5...80Гц*
Смещения для частоты ниже частоты перехода**, мм	0,075*
ускорения для частоты выше частоты перехода**. м/с ²	9.8*

Примечания: * испытания максимальных величин производится по требованию потребителя;

** с частотой перехода от 57 до 62 Гц.



Рисунок 8 – Заливка электронной платы устройства жидким компаундом (пример)

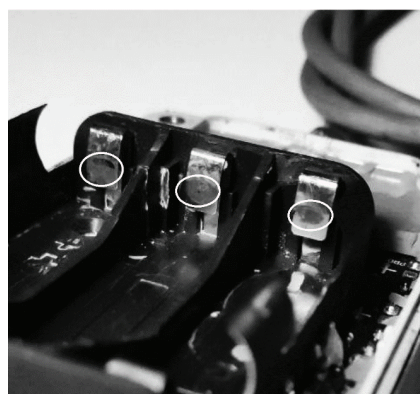


Рисунок 9 – Пятна электрохимической коррозии на контактах батарейного отсека

испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий» [20]. Процедура выполняется для нескольких устройств, выбранных из серии (не менее 3-х).

Виброустойчивость – свойство объекта под действием установленной вибрации выполнять свои функции и сохранять работоспособность и неизменность своих паспортных параметров, указанных в технических условиях, стандартах на изделия и программе испытаний. Испытания на виброустойчивость обычно проводят при подключённом источнике питания и в процессе воздействия вибрацией регистрируют контроль параметров изделия.

Вибропрочность – испытание на прочность изделия до и после заданного уровня вибрации и продолжительности испытаний. Проводят с целью установить – может ли изделие противостоять разрушительному действию вибрации, при этом сохраняя свои параметры после завершения ее воздействия в пределах значений, указанных в технических условиях, стандартах на изделие и программе испытаний.

Приведем практический пример еще одного отрицательного эффекта, вызванного вибрацией и связанного с химической коррозией. На рисунке 9 показана фотография батарейного отсека промышленного устройства. Отсек был заключен в герметичный корпус класса защиты IP67, герметичность корпуса и целостность элементов питания не нарушались. Материал контактов и электродов батарей – пружинистая сталь, покрытая никелем. Гальванические элементы плотно обжаты боковыми держателями и прижимаются сверху фиксирующим кронштейном.

Однако промышленная эксплуатация устройств по прошествии одного года показала, что в местах соприкосновения электродов гальванических элементов с контактами батарейного отсека возникают пятна коррозии. Особенно хорошо пятно видно на крайнем правом контакте (рисунок 9). В конечном итоге это приводит к полной потере контакта с гальваническими элементами и выходу устройства

из строя. Понятно, что легко открыть отсек, провести чистку контактов и заменить батареи. Но разберем причину этого явления.

Вибрация, воздействующая на батарейный отсек, приводит к постоянным небольшим смещениям элементов питания в их установленных позициях, вызывая при этом трение между электродом батареи и контактом отсека. Протекающий ток между электродами батарей и контактами батарейного отсека создает условия для ускорения химической коррозии. Вода для этого процесса поставляется из остаточной влажности воздуха внутри корпуса. Стоит отметить, что влага с воздухом будет проникать в корпус каждый раз, когда будет необходима замена элементов питания. Поэтому понятно, что как только слой никеля будет поврежден, то коррозионный процесс пойдет быстрее до полной потери контакта с элементом питания.

В качестве защитной меры предлагается дополнительное лужение контактов безсвинцовыми или серебряными припоями, закрытие корпуса с осушением воздуха и применение силикагелевых поглотителей влаги для возможности дальнейшей замены батарей.

Заключение. Рассмотрены особенности применения химических источников тока и суперконденсаторов в составе устройств, работающих на карьерах и шахтах. Обоснована необходимость использования этих элементов на подвижных органах горной техники. Произведён обзор климатических воздействий и агрессивных сред, а также анализ их влияния на рабочие характеристики рассматриваемых элементов. Отдельное внимание уделено вопросу воздействия подземных вод в шахтах. Осуществлен подбор реальных компонентов, соответствующих группе исполнения D2 – диапазон температур окружающего воздуха от -50 до $+85$ °С. Предложена оценка уровней ускорений и частоты как составляющих вибрационных воздействий в процессе бурения. Определены стандарты для соответствия по климатическому и вибрационному исполнению, а также защиты от коррозии. Описан процесс компандирования как один из способов комплексной защиты электронных компонентов изделий. Приводится пример накопительного эффекта влияния вибрационной нагрузки на надежность электрических контактов батарейных отсеков, сопряжённого с электрохимической коррозией.

Рассмотренные особенности эксплуатации, а также методы подхода к выбору элементов позволяют нам сделать следующие выводы:

- построение устройств для передачи телеметрии горных работ должно осуществляться с учетом климатических воздействий, в частности, широкого температурного диапазона. При этом стоит учитывать, что доступный выбор элементной базы весьма ограничен;
- следует уделять больше внимания вопросам воздействия вибраций и принимать защитные меры как для отдельных элементов, так и для конструкции в целом;
- необходимо проводить заводские испытания выборочных изделий по стандартам соответствующих групп;
- устройства, предназначенные для работы в шахтах, должны проектироваться и испытываться с учетом агрессивного воздействия подземных вод.

Поступила: 28.08.2023; рецензирована: 12.09.2023; принята: 14.09.2023.

Литература

1. Texas Instruments / Humidity and Temperature Sensor Node for Star Networks Enabling 10+ Year Coin Cell Battery Life // TI Designs. 2006 P. 1. URL: <https://www.ti.com/tool/TIDA-00374#overview> (дата обращения: 26.08.2023).
2. Гриц В.И. Ионисторы / В.И. Гриц, Т.В. Дубовой // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Новосибирск: Сибирский госуд. аэрокосмический ун-т им. акад. М.Ф. Решетнева, 2015. 240 с.
3. Syeda Wishal Bokhari. Advances in graphene-based supercapacitor electrodes / Syeda Wishal Bokhari, Ahmad Hassan Siddique, Peter C. Sherrell, Xiaoyu Yue and etc. // Energy Reports. 2020. Vol. 6, Nov. Pp. 2768–2784.
4. High Energy Super-capacitors / PR1100F08R0-045W-050L-S, 1100 FARAD HIGH ENERGY SUPERCAPA. URL: <https://www.powerresponder.co/> (дата обращения: 26.08.2023).

5. *Постнов А.А.* Обзор современных методов получения полезной энергии для питания беспроводных датчиков, участвующих в передаче телеметрии буровых работ / А.А. Постнов // Проблемы автоматизации и управления. 2023. № 2. С. 81–90.
6. ГОСТ 12997–84. Изделия ГСП. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007.
7. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Стандартинформ, 2010.
8. *Кулова Т.Л.* Проблемы низкотемпературных литий-ионных аккумуляторов / Т.Л. Кулова, А.М. Скундин // Электрохимическая энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 61–88.
9. SL-360/P (Tadiran), элементы литий-тионилхлоридные (Li-SOCl₂). URL: <https://tadiranbat.com/applications/low-temperature/> (дата обращения: 26.08.2023).
10. *Qian Zhang.* Ultra-low temperature flexible supercapacitor based on hierarchically structured pristine polypyrrole membranes / Qian Zhang, Yimeng Li, Jianhua Zhu, Lizhen Lan // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 420. Part 1.
11. *Бурашникова М.М.* Гибридные суперконденсаторы на основе водных электролитов / М.М. Бурашникова, В.В. Клюев, Т.С. Храмова, С.Д. Гриценко // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19. № 1. С. 3–36.
12. *Вольфович Ю.М.* Электрохимические суперконденсаторы (обзор) / Ю.М. Вольфович // Электрохимия. 2021. Том 57. № 4. С. 197–238.
13. ГОСТ 28199-89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Испытания. М.: Стандартинформ, 2006.
14. ГОСТ 14254-96. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP). М.: Российский ин-т стандартизации, 1996.
15. ГОСТ 9.106–2021. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения. М.: Российский ин-т стандартизации, 2021.
16. *Мингазов Р.Р.* Снижение вибрации в процессе бурения путем совершенствования конструкции PDC долот / Р.Р. Мингазов, Г.Г. Ишбаев, А.Ю. Драган, В.У. Ямалиев // Инструмент и оборудование. 2021. 16 с.
17. *Двойников М.В.* Повышение эффективности бурения наклонных и горизонтальных скважин / М.В. Двойников, А.А. Куншин // Neftegaz, RU. 2020. № 4. С. 169–171.
18. *Игамбердиев И.П.* Методы оценки технического состояния буровых станков / И.П. Игамбердиев. Навои: Изд-во им. Алишера Навои, 2019. 186 с.
19. КППД-1, компаунд заливочный / Группа компаний «Симметрон», Москва. URL: <https://www.symmetron.ru/> (дата обращения: 26.08.2023).
20. ГОСТ 30630.0.0–99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000.